

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار-عنابة
2017

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat en Sciences

**Cartographie des zones à risque de glissements de terrain
au voisinage de l'autoroute Est/Ouest (Algérie) dans sa
partie Est entre Constantine et Azzaba
et estimation des risques associés**

Option :

Géologie

Par

ACHOUR YACINE

Devant le jury :

PRESIDENT :	Bouabsa Lakhdar	Pr.	U.B.M. ANNABA
DIRECTEUR DE THÈSE :	Boumezbeur Abderrahmane	Pr.	U.L.T. TEBESSA
CO-DIRECTEUR :	Chouabbi Abdelmadjid	Pr.	U.B.M. ANNABA
EXAMINATEURS :	Khanchoul Kamel	Pr.	U.B.M. ANNABA
	Khiari Abdelkader	Pr.	U.L.B.M. OUM EL BOUAGHI
	Fehdi Chemseddine	Pr.	U.L.T. TEBESSA

*A mes parents qui ont souhaité pour leur fils d'être un homme utile dans la vie.
A mon épouse qui partage avec moi le bonheur et les difficultés durant mon doctorat.
A mes enfants Khadidja, Israa et Mouad pour le plaisir de les voir grandir sainement.*

REMERCIEMENTS

Je suis très reconnaissant à l'égard de Dieu le tout puissant, l'omnipotent et l'omniscient ! C'est ma foi inébranlable en notre créateur (Dieu) qui m'a permis de faire face aux épreuves de la vie, d'affronter les situations difficiles et de réussir dans mes études. Louange et gloire à Dieu pour tous les bienfaits qu'il m'a apportés.

Il est parfois difficile de travailler jour après jour sur le même projet. A plusieurs reprises, il m'a fallu prendre un peu de recul afin de résoudre des problèmes qui me semblaient insurmontables. Le soutien moral et technique des personnes de mon entourage a été pour moi d'une aide très précieuse. Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de thèse, *Boumezbeur Abderrahmane*, Professeur à l'Université de Tébessa, pour ses conseils. Je remercie aussi mon co-directeur *Chouabbi Abdelmadjid*, Professeur à l'Université d'Annaba pour ses connaissances si précieuses. Je suis reconnaissant pour le temps conséquent qu'ils m'ont accordé, leurs qualités pédagogiques et scientifiques, leur franchise et leurs conseils qui ont été prépondérants pour la bonne réussite de cette thèse. J'ai beaucoup appris à leurs côtés, notamment à être plus rigoureux, et je leur adresse toute ma gratitude pour cela.

Je remercie également tous les membres du jury pour leur temps et leur implication. Mes remerciements et toute ma gratitude sont pour Monsieur *Bouabsa Lakhdar*: Professeur à l'université d'Annaba, pour avoir accepté de présider le jury de ce mémoire. Mes sincères remerciements vont à Monsieur *Khiari Abdelkader*: Professeur à l'Université de Oum El Bouaghi, pour avoir accepté d'examiner mon travail et pour l'intérêt qu'il y a porté. Je tiens également à présenter mes remerciements à *Khanchoul Kamel*: Professeur à l'Université d'Annaba, d'avoir accepté d'être examinateur de ce mémoire de doctorat. Merci à *Fahdi Chemseddine*: Professeur à l'Université de Tébessa, d'avoir accepté d'être membre du jury de ce doctorat malgré la distance.

J'adresse mes chaleureux remerciements à *Bendaoud El Amine*, Docteur à l'Université de Sétif pour son attention de tout instant sur mes travaux, pour ses conseils avisés et son écoute.

Sans la collaboration de l'ex-directeur régional de l'Agence Nationale des Autoroutes *Debbah Ahmed*, mon projet de recherche aurait été bien plus ardu.

Toutefois, il n'aurait probablement pas été possible sans aide financière. Je le remercie pour son aide précieuse.

Je suis très honoré d'avoir eu l'occasion de discuter de certains résultats et analyses au cours de mon stage au Portugal avec *Victor Cavaleiro*, Professeur à l'institut de Génie Civil, Université Beira Interior, Portugal. Je le remercie pour son accueil à Covilhã.

Je désire grandement remercier les enseignants qui m'ont enseigné durant mon parcours universitaire qui m'ont fait découvrir avec passion leur métier et m'ont ainsi servi de modèles. Je tiens à remercier tout particulièrement *Hadji Riheb* et *Abdalah Bouguerra*.

Je remercie également les amis de toujours : *Seguni Salim*, *Noui Ammar*, *Bouglada Mohamed Salah*, *Abdelhakim Benhamouda*. Je remercie aussi tous les enseignants du département de Génie Civil, Université de Bordj Bou Arréridj.

Par ailleurs, cette thèse n'aurait pu voir le jour sans la collaboration de nombreuses personnes qui m'ont apporté une aide indispensable et à qui j'exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude :

Merci à *Segueni Salim* et *Achour Mounir* pour tout le temps passé à la relecture de ce mémoire.

Dans un travail de thèse marqué par une forte composante terrain, le travail d'équipe est primordial. Je remercie *Achour Mounir* et *Achour Houssam* qui ont accepté de venir m'accompagner sur le terrain lors des inventaires.

Je tiens à remercier ma famille et mes proches. Tous m'ont encouragé durant la réalisation de ce projet. Un remerciement tout particulier à mon frère *Tahar* et à sa famille.

Je témoigne, au final, ma reconnaissance à toutes les autres personnes qui m'ont soutenu pour la soutenance de ma thèse, que je dédie à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à son élaboration.

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain le long d'un tronçon de l'Autoroute Est-Ouest (AEO) à Constantine, Algérie. Les glissements de terrain sont fréquents dans la région d'étude et affectent gravement les conditions de vie locales. En vue d'une meilleure gestion de ce phénomène, les décideurs doivent pouvoir disposer de cartes de susceptibilité, leur permettant d'identifier les zones de leur région où de nouveaux glissements de terrain auront une plus forte probabilité de se déclencher dans le futur. Cette étude présente une nouvelle procédure pour évaluer et cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain. Cette dernière est évaluée par deux méthodes différentes : l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP) et la Pondération de l'Infirmation (IV). Une carte d'inventaire des glissements de terrain, avec un total de 29 emplacements, a été créée à partir des données historiques, photos aériennes, images satellitaires et un grand travail sur le terrain. L'utilisation des logiciels SIG permet de créer, d'enregistrer, de classer, d'interpréter et de présenter les données nécessaires à la réalisation des modèles. Une couche thématique est générée pour chaque facteur géo-environnemental influant sur les glissements de terrain. Ces facteurs sont : «la pente», «l'exposition des versants», «la lithologie», «l'occupation des sols », «la proximité au réseau hydrographique», «la proximité aux failles» ainsi que les paramètres géotechniques «cohésion et angle de frottement interne ». L'analyse des relations entre ces facteurs et les glissements de terrain (carte d'inventaire) a ensuite été réalisée dans un environnement SIG. Une validation statistique (ROC) ainsi qu'une validation sur le terrain des modèles construits permettent de considérer les deux modèles comme acceptables.

Les résultats sont discutés et comparés afin d'évaluer la concordance entre ces méthodes. L'analyse et la comparaison de ces résultats montre que :

- Les modèles produits par les deux approches sont plus ou moins similaires;
- La méthode de la pondération de l'infirmité est la meilleure méthode pour la cartographie de l'aléa glissement de terrain dans la zone d'étude, car elle peut indiquer les zones qui sont sensibles aux glissements de terrain d'une manière précise comparativement à l'AHP. Par conséquent, elle pourrait être

utilisée comme méthode de cartographie de susceptibilité aux glissements de terrain le long d'autres sections, de l'autoroute Est-Ouest, aux conditions environnementales proches.

Cette recherche aidera à accroître la sensibilisation, d'atténuer et de contrôler les glissements de terrain au niveau local. En effet et sur la base des résultats obtenus dans cette étude, des recommandations et des perspectives sont toutefois formulées pour aider les décideurs, les planificateurs, les géologues et les ingénieurs géotechniciens à prendre des décisions liées à ce phénomène.

Mots clés

Système d'information géographique (SIG)

Glissement de terrain

Analyse multicritère hiérarchique (AHP)

Pondération de l'information (IV)

Autoroute Est-Ouest

Algérie.

Abstract

This research work deals with the landslide susceptibility mapping along a highway road section in Constantine region, NE Algeria. Landslides are frequent in the study area and affect seriously on local living conditions. For a better management of this phenomenon, the decision makers must be able to have susceptibility maps, allowing them to identify the zones of their area where new landslides will have a higher probability of triggering in the future. This study presents a novel procedure for assessing and mapping landslide susceptibility. This latter is evaluated by two different methods: Analytic Hierarchy Process (AHP) and information value (IV). The landslide inventory map which has a total of 29 single landslide locations was created based on historical information, aerial photo interpretation, remote sensing images and extensive field surveys. The use of GIS software makes it possible to create, record, classify, interpret and present the data they need to carry out both models. A thematic layer map is generated for every geo-environmental factor considered for this study, which are “slope gradient”, “slope aspect”, “lithology”, “land use”, “distance from streams”, “distance from faults” and geotechnical parameters “cohesion and angle of internal friction”. The analysis of the relationships between the landslide-related factors and the landslide events was then carried out in GIS environment. Statistical and field validations of the constructed models make it possible to consider both models as acceptable.

The results are discussed and compared in order to evaluate the agreement between these methods. Analysis and comparison of these results shows that:

- The models produced by the two approaches are more or less comparable ;
- The information value method is the best method for the landslide susceptibility mapping in the study area because it can indicate, precisely, areas that are prone to landslides comparatively with the AHP one. Therefore , it could be used as a landslide susceptibility mapping zonation method along other sections, of the East-West highway, with similar environmental conditions.

This research will help increase awareness, mitigate and control landslides at the local level. Based on the results obtained in this study, recommendations and

perspectives are formulated to help decision-makers, planners, geologists and geotechnical engineers in order to make decisions related to this phenomenon.

Keywords

Geographic Information System (GIS)

Landslides

Analytic hierarchy process (AHP)

Information value (IV)

East-West Highway

Algeria

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى رسم خرائط قابلية التربة للانهييارات الأرضية على حافة الطريق السيار شرق / غرب بمقطعه الشرقي في قسنطينة، الجزائر. اذ تعتبر الانهييارات الأرضية من الظواهر الأكثر شيوعا في هذه المنطقة، حيث تأثر و بشكل خطير على ظروف الحياة هناك. و لأجل إدارة أفضل لهذه الظاهرة، يجب أن يتوفر لدى صناع القرار المحليين مثل هذا النوع من الخرائط. هذه الأخيرة تتيح لهم التعرف على المناطق، داخل إقليمهم، التي من المرجح أن تحدث فيها انهييارات أرضية جديدة في المستقبل.

تأتي هذه الدراسة لتقدم إجراءات جديد لتقييم قابلية الأتربة للانهييارات الأرضية. يتم هذا التقييم بواسطة طريقتين مختلفتين: التحليل الهرمي (AHP) و ترجيح المعلومات (IV). في هذه الدراسة و استنادا على المعلومات الموجودة في الأرشيف، تحليل الصور الجوية و صور الأقمار الصناعية بالإضافة إلى عمل جبار في الميدان، تم إنشاء ما يسمى بخريطة الجرد لمواقع الانهييارات الأرضية والتي بلغ عددها في المنطقة 29 موقعا. استخدام برمجيات نظم المعلومات الجغرافية (SIG) سمح لنا بإنشاء، تسجيل، تصنيف، شرح وتقديم البيانات اللازمة لتنفيذ نماذج قابلية التربة للانهييارات الأرضية. كما تم إنشاء خريطة (طبقة) لكل عامل من العوامل الجغرافية-البيئية المؤثرة في عملية الانهييارات الأرضية، حيث تم التركيز على العوامل التالية: "الميل"، "اتجاه المنحدرات"، "الخصائص الصخرية"، "شغل الأراضي"، "المسافة إلى المجاري المائية"، "المسافة إلى الصدوع" بالإضافة إلى الخصائص الجيوتقنية " التماسك و الاحتكاك الداخلي". بعدها تم تحليل العلاقة بين هذه العوامل والانهييارات الأرضية (خريطة الجرد) باستعمال نظم المعلومات الجغرافية ليتم في الأخير إنشاء النماذج النهائية باستعمال الطريقتين المذكورتين أعلاه.

سمح لنا التحقق من صحة هذه النماذج بالطرق الإحصائية (ROC) بالإضافة إلى التأكد مباشرة في الميدان بقبول النموذجين المنجزين. إذ بعد التحليل ومقارنة النتائج المستخلصة من تقييم العلاقة بين الطريقتين المستعملتين تبين ما يلي:

- وجود تشابه لحد ما بين الأسلوبين المتبعين في هذه الدراسة
- طريقة ترجيح المعلومات (IV) هي أفضل طريقة لرسم خرائط خطر الانهييارات الأرضية في المنطقة المدروسة، لقدرتها على الإشارة إلى المناطق التي ستكون عرضة لهذه الانهييارات مقارنة مع الطريقة الأخرى. وبالتالي، فإنه يمكن استخدامها كوسيلة من اجل رسم خرائط أخرى لقابلية التربة للانهييارات الأرضية وذلك على طول مقاطع أخرى من الطريق السيار شرق-غرب، تكون مماثلة للمقطع المدروس من حيث العوامل المؤثرة.

في الأخير، فان هذا البحث سيساعد على زيادة الوعي، المراقبة و التخفيف من الانهيارات الأرضية على المستوى المحلي. و بناءا على النتائج المتحصل عليها في هذه الدراسة، تم وضع بعض التوصيات بالإضافة إلى الآفاق و ذلك لمساعدة المسؤولين المحليين، المخططين و مهندسي الجيولوجيا و الجيوتقنية لاتخاذ القرارات المتعلقة بهذه الظاهرة.

الكلمات المفتاحية

نظام المعلومات الجغرافية (GIS)

الانهيارات الأرضية

التحليل الهرمي (AHP)

ترجيح المعلومات (IV)

الطريق السيار شرق / غرب

الجزائر

Sommaire

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

Sommaire

Acronymes.....	I
Liste des Figures	II
Liste des Photos.....	V
Liste des Tableaux.....	VI

Introduction Générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre 1 - Analyse bibliographique

1. Introduction.....	5
2. Le risque mouvement de terrain et ses effets.....	5
3. Caractéristiques des mouvements de terrain.....	7
3.1. Classification des mouvements de terrain.....	8
3.2. Description des principaux types de mouvements de terrain.....	10
3.3. Types d'activité.....	15
3.3.1. L'état d'activité.....	15
3.3.2. Répartition de l'activité.....	17
3.3.3. Morphologie.....	18
3.4. Vitesse des déplacements.....	19
4. Cartographie des glissements de terrain.....	21
4.1. Inventaire des glissements de terrain.....	21
4.2. La susceptibilité aux glissements de terrain.....	23
4.2.1. Principes de base.....	23
4.2.2. Échelle de cartographie.....	24
4.2.3. Méthodes pour la cartographie de la susceptibilité.....	25
a) L'approche qualitative.....	26

b) L'approche semi-quantitative.....	27
c) L'approche quantitative.....	32
o Méthodes bivariées.....	32
o Méthodes multivariées.....	33
4.2.4. Le rôle des logiciels de Système d'Information Géographique (SIG).....	34
5. Conclusion.....	35

Chapitre 2 - Description de la zone d'étude

1. Introduction.....	36
2. La région de Constantine : Un contexte climatique et morphostructural particulier.....	36
2.1. Localisation géographique.....	36
2.2. Climat.....	37
2.2.1. Précipitations.....	38
2.2.2. Température.....	41
2.3. Morphologie.....	43
2.4. Contexte géologique.....	44
2.4.1. La chaîne littorale.....	46
o Le domaine interne.....	46
o Le domaine des flyschs.....	46
o Le domaine externe.....	46
2.4.2. L'ensemble de l'avant pays (séries Atlasiques).....	48
o L'unité néritique Constantinoise.....	48
o L'unité néritique du sud Sétifien.....	49
o Les écailles des Sellaoua.....	49
o L'avant pays autochtone.....	50
2.4.3. Les phases tectoniques.....	50
a) Les événements tectoniques du Mésozoïque.....	50
b) Les événements tectoniques du Tertiaire.....	52
c) La tectonique récente.....	54
2.4.4. Géologie locale.....	55
o Trias.....	55

o La nappe néritique constantinoise.....	56
o Les nappes telliennes.....	58
o La nappe numidienne ou flysch numidien.....	59
o Les séries post-nappes.....	60
o Log stratigraphique synthétique.....	61
2.5. Réseau hydrographique.....	62
2.6. Sismicité.....	63
3. Le site d'étude principal.....	64
4. Conclusion.....	67

Chapitre 3 - Préparation des données

1. Introduction.....	68
2. Préparation de la carte d'inventaire des glissements de terrain.....	68
3. Variables prédictives.....	79
3.1. Paramètres topographiques.....	79
3.1.1. Le gradient de pente.....	88
3.1.2. L'exposition des versants.....	90
3.2. Lithologie.....	92
3.3. Proximité aux failles.....	97
3.4. Proximité au réseau hydrographique.....	99
3.5. Occupation du sol.....	100
3.6. Paramètres géotechniques.....	103
4. Conclusion.....	107

Chapitre 4 - Méthodologies d'évaluation et de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain

1. Introduction.....	108
2. Application de la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique.....	110
2.1. Méthodologie.....	110
2.2. Carte de susceptibilité des terrains de la zone d'étude.....	112
2.3. Résultats et discussions.....	114
2.3.1. Evaluation de la robustesse du modèle.....	117

3. Application de la méthode de Pondération de l'Infirmation.....	118
3.1. Méthodologie.....	118
3.2. Carte de susceptibilité des terrains de la zone d'étude.....	120
3.3. Résultats et discussions.....	121
3.3.1. Evaluation de la robustesse du modèle.....	127
4. Comparaison entre les deux approches cartographiques.....	128
5. Conclusion.....	132
Conclusion Générale.....	133

Références Bibliographiques

Annexes

Glossaire

Acronymes

CRED: The Centre for Research on the Epidemiology of Disasters

ONS: Office National des Statistiques

CNES: Conseil National Economique et Social

MATE: Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

ONM : Organisme National de la Météorologie

CRAAG: Centre de Recherche en Astronomie, Astrophysique et Géophysique

ANA: Agence Nationale des Autoroutes

WP/WLI: Working Party on World Landslide Inventory

USGS: United States Geological Survey

ESRI: Environmental Systems Research Institute

SAR: Synthetic Aperture Radar

LIDAR: Light Detection And Ranging

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

SPOT: Système probatoire pour l'observation de la Terre

SIG: Système d'Information Géographique

MNT: Modèle Numérique de Terrain = DEM: Digital Elevation Model

TIN: Triangulated Irregular Network

IDW: Inverse Distance Weighting

ANUDEM: Australian National University Digital Elevation Model

AHP: Analytic Hierarchy Process

CI: Indice de Cohérence

CR: Ratio de Cohérence

IA: Indice Aléatoire

IV: Information Value

ROC: Receiver Operating Characteristic

AUC: Area Under the Curve

LSI: Landslide Susceptibility Index

Liste des Figures

Figure 1 : Type de catastrophes survenues dans le monde de 1990 à 2007 en nombre de sinistrés.....	6
Figure 2 : Représentation schématique des principaux types de mouvement de terrain.....	10
Figure 3 : Les principaux détails et unités d'un glissement de terrain rotationnel.....	13
Figure 4 : Les différents stades d'activité des mouvements de versants.....	17
Figure 5 : Répartition de l'activité d'un mouvement de versant	18
Figure 6 : Morphologie d'un mouvement de versant	19
Figure 7 : Situation géographique de Constantine.....	37
Figure 8 : Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien.....	38
Figure 9 : Variations annuelles des précipitations à Constantine.....	39
Figure 10 : Variations mensuelles des précipitations à Constantine	40
Figure 11 : Carte pluviométrique de la wilaya de Constantine.....	40
Figure 12 : Normales des températures à Constantine, station de Djebel El Ouahch....	41
Figure 13 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien.....	42
Figure 14 : Extrait de la carte topographique au 1/200 000 de la région de Constantine.....	43
Figure 15 : Carte hypsométrique de la région d'étude.....	44
Figure 16 : Les grands domaines d'origine alpine en méditerranée occidentale.....	45
Figure 17 : Les principaux domaines structuraux du Nord algérien.....	45
Figure 18 : Les grands ensembles de l'édifice structural alpin de l'Algérie du nord orientale.....	48
Figure 19 : Situation de l'unité néritique constantinoise par rapport aux domaines des zones externes de la chaîne alpine d'Algérie nord-orientale.....	49
Figure 20 : Colonne stratigraphique de la région d'étude (Synthèse).....	61
Figure 21 : Réseau hydrographique de la région d'étude.....	62
Figure 22 : Zonage sismique du territoire Algérien.....	63
Figure 23 : Orthophoto montrant la localisation du site d'étude.....	64
Figure 24 : Localisation du site d'étude.....	65

Figure 25 : Extrait de la carte géologique d'El Aria au 1/50 000.....	66
Figure 26 : Photographies montrant quelques événements référencés dans Landsat 7	72
Figure 27 : Localisation des glissements de terrains.....	73
Figure 28 : Photos montrant quelques glissements de terrain au voisinage du tracé de l'autoroute Est/Ouest de la section étudiée.....	76
Figure 29 : Histogramme comparatifs du nombre de glissements identifiés par photo-interprétation, données d'archives et sur le terrain.....	77
Figure 30 : Photographies montrant quelques événements recensés sur le terrain qui sont invisibles dans Landsat 7	78
Figure 31 : Courbes de niveau qui ont servi à la création du MNT (partie centrale de la zone d'étude).....	81
Figure 32 : Utilisation de points d'élévation pour l'interpolation de l'élévation d'un point précis.....	82
Figure 33 : Principe de l'interpolation par krigeage.....	83
Figure 34 : Réseau de triangles représentant l'élévation (TIN).....	84
Figure 35 : MNT de la zone d'étude (TIN).....	85
Figure 36 : MNT de la zone d'étude (ANUDEM).....	86
Figure 37 : Comparaison de dérivé pente pour les MNT interpolés par : A) MNT (ANUDEM) B) MNT (TIN) (exemple de la partie extrême Nord du site d'étude).....	87
Figure 38 : Carte des pentes de la zone d'étude.....	89
Figure 39 : Histogramme montrant le pourcentage des différentes classes de pente et le pourcentage de glissements de terrain survenu dans ces classes de pente.....	90
Figure 40 : Carte de l'exposition des versants de la zone d'étude.....	91
Figure 41 : Histogramme montrant le pourcentage des différentes classes de l'exposition de pentes et le pourcentage de glissements de terrain survenu dans ces classes.....	92
Figure 42 : Carte lithologique simplifiée de la zone d'étude.....	94
Figure 43 : Coupes géologiques,(a): au niveau du tunnel 1,(b): au niveau du tunnel 2.	95
Figure 44 : Extrait de la carte géologique de la zone d'étude.....	97
Figure 45 : Carte de proximité aux failles.....	98
Figure 46 : Histogramme montrant le pourcentage des différentes classes de la proximité aux failles et le pourcentage de glissements de terrain survenu dans ces	99

classes.....	
Figure 47 : Carte de proximité au réseau hydrographique.....	100
Figure 48 : Histogramme montrant le pourcentage des différentes classes de la proximité au réseau hydrographique et le pourcentage de glissements de terrain survenu dans ces classes.....	101
Figure 49 : Carte d'affectation de sol.....	102
Figure 50 : Histogramme montrant le pourcentage des différentes classes de l'occupation du sol et le pourcentage de glissements de terrain survenu dans ces classes	103
Figure 51 : Localisation des sondages carottés réalisés par l'ANA dans la zone d'étude.....	104
Figure 52 : Carte thématique de la cohésion.....	105
Figure 53 : Carte thématique de l'angle de frottement interne.....	106
Figure 54 : Organigramme montrant la méthodologie globale appliquée dans cette étude.....	109
Figure 55 : Principe de fonctionnement de l'AHP.....	111
Figure 56 : Procédure de d'évaluation de la susceptibilité par l'AHP dans le secteur d'étude.....	112
Figure 57 : Carte de susceptibilité de la zone d'étude obtenue par AHP.....	116
Figure 58 : Taux de réussite du modèle construit par AHP.....	118
Figure 59 : Principe de construction des cartes de susceptibilité par IV.....	120
Figure 60 : Carte de susceptibilité de la zone d'étude obtenue par IV.....	125
Figure 61 : Taux de réussite du modèle construit par IV.....	127
Figure 62 : Comparaison statistique entre les courbes de réussites calculées à partir des deux approches.....	129
Figure 63 : Comparaison experte des résultats des deux approches dans le secteur de Djebel El Ouahch: a) AHP, b) IV.....	131
Figure 64 : Cube de l'information géographique	Glossaire
Figure 65 : Définition du risque naturel	Glossaire
Figure 66 : Schéma Raster	Glossaire
Figure 67 : Schéma Vecteur	Glossaire

Liste des Photos

Photo 1 : Chute de blocs sur la RN 9 Aokas, Bejaia (Algérie), déclenché en 2015.....	11
Photo 2 : Basculement corniche calcaire lié au fluage des marnes sous-jacentes, falaises du Bessin, Calvados (1983).....	11
Photo 3 : Glissement de terrain sur la route du lac Cecil, Peace River.....	14
Photo 4 : Glissement rocheux, lac Brazeau, Île de Vancouver.....	14
Photo 5 : Coulée boueuse, Autoroute de Taïwan, 2010.....	15
Photo 6 : Grès Oligocènes très fracturés.....	96
Photo 7 : Marne dégradée.....	96

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Classification des mouvements de terrain (Varnes, 1978).....	09
Tableau 2 : Classes de vitesses définies par Varnes (1978).....	20
Tableau 3 : Les différentes échelles d'analyse pour l'aléa mouvements de versant.....	25
Tableau 4 : L'échelle de comparaison de Saaty.....	31
Tableau 5 : Détermination de l'Indice Aléatoire.....	31
Tableau 6 : Formations géologiques rencontrées dans la zone d'étude.....	93
Tableau 7 : Matrice de comparaison par paire des différents facteurs utilisés.....	114
Tableau 8 : Densités des glissements de terrain pour les différentes zones de susceptibilité (AHP).....	117
Tableau 9 : Les valeurs informatives dans chaque classe des différents facteurs.....	121
Tableau 10 : Densité des glissements de terrain pour les différentes zones de susceptibilité (IV)	126

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

Un Risque naturel est dû à des phénomènes essentiellement naturels (mouvements de terrain naturels, phénomènes hydro-météorologiques). Les risques naturels se traduisent par la combinaison entre l'aléa qui est le phénomène naturel potentiel et la vulnérabilité des éléments exposés à ce phénomène, liée à la présence anthropique (Alexander, 2005).

Les mouvements de terrain occupent une place importante parmi les phénomènes naturels générateurs de risques (Glade, 2001). Ils se déclenchent préférentiellement dans des zones où prédominent des conditions d'équilibre des sols relativement précaires et sont le plus souvent aggravés par des sollicitations hydrauliques, sismiques ou anthropiques. Ils peuvent être actifs, inactifs ou dormants et peuvent affecter une surface réduite ou bien des versants entiers sur des profondeurs variables. Toutes ces caractéristiques font un phénomène complexe de la géomorphologie (Terzaghi, 1960). Lorsqu'ils interfèrent avec les activités humaines, ces phénomènes deviennent de véritables risques naturels majeurs responsables des dommages conséquents en termes financiers et/ou de vies humaines. Très souvent les conséquences socio-économiques provoquées par ces phénomènes restent largement sous-estimées, car ils représentent fréquemment une partie des catastrophes à dangers multiples (Schuster, 1996).

En Algérie, le rapport de CNES et du MATE 2003 indique que les mouvements de terrains menacent et affectent plusieurs villes Algériennes. Ces mouvements ont pris une grande ampleur dans l'espace urbain, portant essentiellement atteinte à l'économie, nécessitant la destruction de plusieurs constructions et le relogement de nombreuses familles. Ce constat met donc en évidence l'importance et l'enjeu scientifique résidant dans la nécessité de prédire l'occurrence spatiale de ces événements.

La très grande majorité des recherches menées sur les mouvements de terrain est conduite dans les milieux montagneux, là où les processus sont spectaculaires. La région de Constantine fait partie de ces régions largement affectées par les phénomènes de mouvements de terrain. Ces derniers constituent généralement des phénomènes ponctuels, de faible ampleur et d'effets limités. Cependant, par leur diversité

(mouvements dûs aux vides souterrains et à la pente ou versant) et leur fréquence dans cette région, ils sont néanmoins responsables de dommages et de préjudices importants et coûteux.

Le risque mouvement de versant (glissements, éboulements) constitue actuellement un problème majeur dans cette région, car elle est située sur des terrains très escarpés, accidentés et sismiquement actifs. Ces mouvements se sont aggravés lors des épisodes orageux. En effet, la plupart des glissements de terrains sont réactivés au cours des hivers où la pluviométrie moyenne varie de 325 mm à 767 mm. Le risque « glissement de terrain » identifié sur la région de Constantine est essentiellement lié à des facteurs de prédisposition : facteurs géologiques, structurels, hydrologiques, géotechniques et à d'autres facteurs déclenchants telle que l'action humaine et la sismicité.

La susceptibilité des terrains aux glissements peut être évaluée grâce à plusieurs méthodes, les plus couramment utilisées étant les approches heuristiques et statistiques (Dai et al., 2002).

Objectifs de la recherche

L'objectif principal de ce travail est de tester les différents outils et techniques de la modélisation et d'apporter des éléments de réponse quant à l'évaluation et la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain au voisinage d'un tronçon de l'autoroute Est/Ouest à Constantine.

Cette recherche vise également à contribuer à une meilleure connaissance de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la zone d'étude afin d'informer les administrations locales et les habitants sur les possibilités de glissement de terrain qui peuvent survenir.

Aussi, elle se focalise sur l'évaluation de la contribution des différents facteurs de prédisposition des glissements de terrain, afin de mieux comprendre la complexité du système étudié.

Pour répondre à ces objectifs nous nous sommes appuyés sur l'étude d'un site qui se localise au voisinage d'un tronçon autoroutier en mettant en œuvre de nouveaux

développements méthodologiques. Certains points principaux seront pris en compte dans cette étude :

1. Sélectionner les facteurs de prédisposition en se basant sur les données préexistantes et de l'analyse de l'inventaire des glissements de terrain dans la zone d'étude.
2. Evaluer le rôle des facteurs de prédisposition dans la zone d'étude et de préparer des cartes d'entrée de ces facteurs pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain.
3. Appliquer plusieurs méthodes pour élaborer les cartes de susceptibilité de la zone d'étude.
4. Comparer les résultats de différentes approches pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans le but de trouver la meilleure carte, pour une ultérieure utilisation dans la prévention, et de transposer la méthodologie retenue sur des sites aux caractéristiques géomorphologiques semblables.

Organisation générale de la thèse

Afin de répondre à la démarche de recherche choisie, la thèse est articulée en quatre chapitres.

Le premier chapitre de cette thèse est consacré à une réflexion générale et à une mise en perspective des recherches engagées sur les mouvements de terrain, la répartition zonale des catastrophes et des risques ainsi que certains concepts de base, comme l'aléa et la susceptibilité. En outre, la diversité des mouvements de terrain est décrite en détail en s'appuyant sur les différentes classifications couramment admises. Puis l'activité des mouvements de terrain est définie et discutée. Ce chapitre dresse aussi un état de l'art des méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa. L'apport des SIG comme outil d'aide à la compréhension des phénomènes et à leur analyse spatiale est discuté.

Le deuxième chapitre décrit plus précisément les caractéristiques géographiques du secteur d'étude, avec les conditions météo-climatiques, morphologiques et géologiques

en se fondant sur des données et études préexistantes et sur les cartes topographiques et géologiques.

Le troisième chapitre est consacré à l'exposition des résultats de l'inventaire, cette étape d'inventaire permet de disposer d'un premier jeu de données de base, indispensable à la cartographie de la susceptibilité. Les variables prédictives sont ensuite présentées, il s'agit d'une description des facteurs qui jouent des rôles importants dans l'occurrence des glissements de terrain dans le site d'étude. Ces facteurs sont : l'altitude, le gradient de pente, l'exposition des versants, la géologie, la proximité aux failles, la distance au réseau hydrographique, l'occupation de sol et les paramètres géotechniques (cohésion et angle de frottement interne).

Le quatrième chapitre est orienté autour de la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain de la zone d'étude. Deux approches différentes pour la cartographie sont considérées ; une méthode basée sur des approches semi-quantitatives, il s'agit de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP). Pour les approches probabilistes, une méthode bivariée dite Pondération de l'Infirmation (IV) est retenue. Les résultats et interprétations de la modélisation de la susceptibilité pour les deux méthodes ont été présentés et discutés. Ce chapitre propose également la comparaison entre ces méthodes de cartographie.

Pour conclure, nous proposons un bilan de notre travail en mettant en évidence ses résultats ainsi que les perspectives que nous pouvons dès maintenant proposer.

Chapitre 1

Analyse bibliographique

1. Introduction

De très nombreux pays du monde sont confrontés à des phénomènes naturels susceptibles de provoquer des catastrophes. Ces phénomènes peuvent être d'origines variées ; *géodynamique* avec les séismes et les éruptions volcaniques, *hydro-météorologique* avec les cyclones et tempêtes, les inondations et les avalanches, ou bien encore *géomorphologique* avec les mouvements de terrain. Ces phénomènes naturels se répartissent un peu partout. (Remaître, 2008)

Si pour certains phénomènes, comme les séismes, l'homme n'est pas responsable de leur déclenchement, pour d'autres, et particulièrement pour les mouvements de terrain, il pourra prendre une part notable à la fois dans leur déclenchement comme dans leur aggravation. D'autre part, l'homme a parfois une large part de responsabilité dans l'importance des conséquences directes ou indirectes de ces phénomènes dans la mesure où il a maintenu et développé des implantations et activités dans des secteurs réputés "à risque". Les risques naturels majeurs sont la combinaison d'un aléa (phénomène naturel) et d'une vulnérabilité liée à la présence humaine (personnes, habitations, activités économiques, infrastructures, etc.). Ainsi, le nombre de victimes et le coût des dommages peuvent être élevés selon les circonstances, et en fonction de l'intensité, de la soudaineté et de la durée du phénomène. Les mouvements de terrain se rencontrent sous toutes les latitudes. De très nombreux pays sont concernés à des degrés divers et plus particulièrement dans certaines régions. Les pays qui sont les plus touchés et dans lesquels on relève le plus de victimes sont la Chine, les pays andins, le Tadjikistan, le Japon, l'Inde, l'Italie, les Etats-Unis, les pays Alpains. Puis, viennent l'Indonésie, l'ex-Union Soviétique, le Népal, etc. (Remaître, 2008)

2. Le risque mouvement de terrain et ses effets

Les catastrophes provoquées par les mouvements de terrain n'atteignent pas l'ampleur des inondations, des cyclones ou des séismes, dans la mesure où les mouvements de terrain sont très localisés (Ledoux, 1995). Selon le rapport de CRED (*the Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*), ces catastrophes représentent 4.9 % dans la répartition des phénomènes naturels dans le monde (Fig.1). Le nombre de victimes est ainsi beaucoup plus faible que pour les autres aléas. En 1979, la commission sur les

mouvements de terrain de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur estimait que 14 % des pertes de vies humaines lors de catastrophes naturelles pouvaient être attribués aux mouvements de terrain. Varnes (1984) estimait qu'entre 1971 et 1974 quelques 600 personnes avaient été tuées chaque année par des mouvements de terrain. Petley (2012) a signalé qu'entre 2004 et 2010, 2620 glissements de terrain avaient tué 32322 personnes. Ce chiffre n'inclut pas les glissements de terrain provoqués par les séismes, et correspond à un peu plus de la moitié du nombre de personnes tuées par des inondations, qui ont fait 7600 victimes chaque année entre 1990 et 2006.

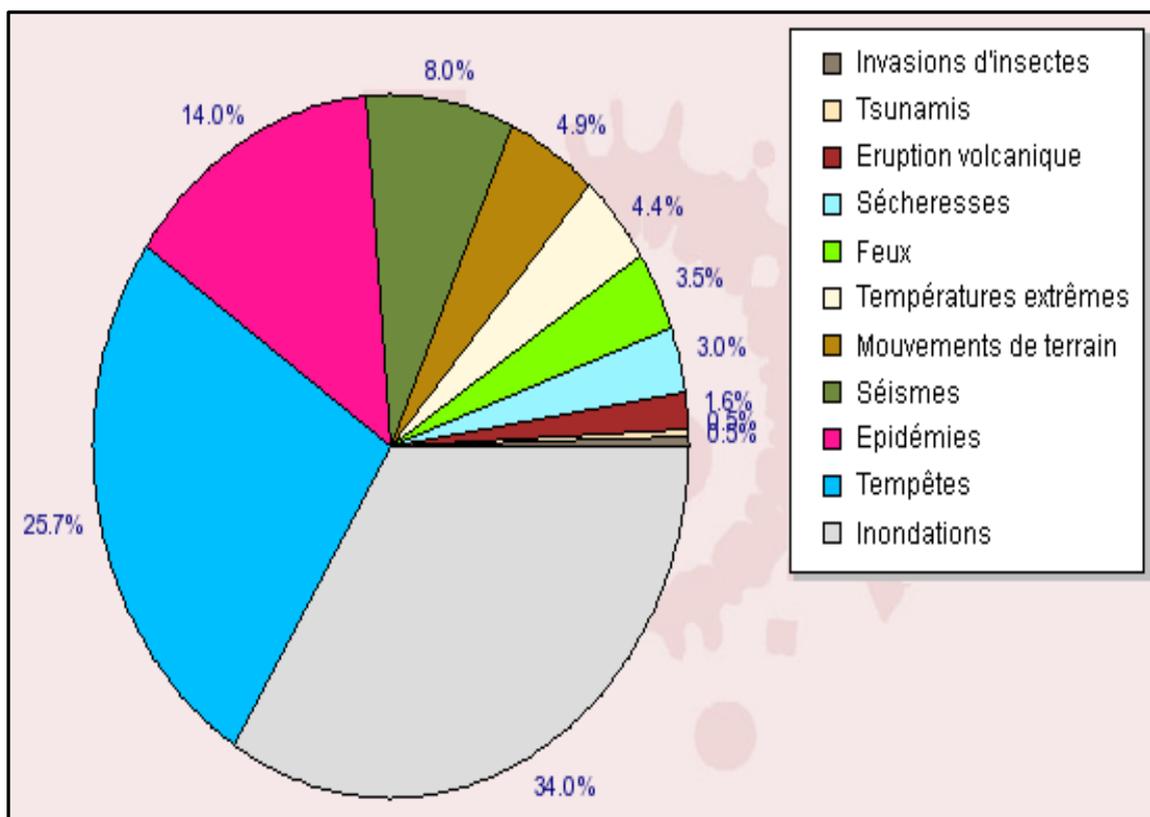


Figure 1. Type de catastrophes survenues dans le monde de 1990 à 2007 en nombre de sinistrés (Source : www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium, 2007)

En Algérie, les rapports du Conseil National Economique et Social et du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (2003) mentionnent et confirment que les mouvements de terrains menacent et affectent plusieurs villes Algériennes. Ces mouvements ont pris une grande ampleur dans l'espace urbain, portant essentiellement atteinte à l'économie, nécessitant la destruction de plusieurs constructions et le relogement de nombreuses familles.

Qu'est-ce qu'un mouvement de terrain?

Les mouvements de terrain font partie des mouvements de masse, mais n'en sont qu'une composante (Flageollet, 1989). Ils impliquent une rupture de pente qui entraîne un déplacement de matériaux. Ils se définissent donc comme des *déplacements gravitaires* de masses de terrains qui sont déstabilisées par des facteurs déclenchants naturels et/ou anthropiques.

A travers cette définition, on détermine, à la fois le processus en lui-même et son résultat, mais également les matériaux accumulés et/ou déplacés (Flageollet, 1989). Ils sont d'une grande variété notamment en ce qui concerne les amplitudes, les roches et les matériaux impliqués, les modes de déplacement, les effets induits et l'environnement géographique. Il faut, la plupart du temps, un agent de déplacement : le plus souvent l'eau joue un rôle primordial dans le déclenchement des mouvements de terrain (Flageollet, 1999). 70% des glissements répertoriés dans le monde ont pour origine ce facteur.

Ces mouvements de terrain présentent des dynamiques variées. Ils peuvent être lents voire imperceptibles pour l'homme. Ils peuvent être également évolués par succession de phases paroxysmales à caractère catastrophique (Flageollet, 1989, 1999).

3. Caractéristiques des mouvements de terrain

Les formes et l'ampleur des mouvements de terrain sont très diverses en raison de la multiplicité des mécanismes d'initiation et d'évolution (érosion, dissolution, déformation et rupture sous charge statique ou dynamique, etc.) liés à la topographie (pente du versant), à la lithologie (caractéristiques physiques et mécaniques), à la structure géologique (pendage, fracturation, superposition des couches, etc.), aux nappes aquifères, à la teneur en eau, etc. Les mouvements de terrain sont liés à un déplacement gravitaire de masses de terrain déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles (fonte de neige, pluviométrie anormalement forte, secousses sismiques, diminution de butée, érosion des berges des cours d'eau, etc.) ou anthropiques (terrassement, vibration, déboisement, exploitation de matériaux, etc.). (Remaître, 2008)

3.1. Classification des mouvements de terrain

On peut classifier les mouvements de terrain de plusieurs façons, chaque méthode ayant une utilité particulière. Quatre classifications sont le plus souvent utilisées : celle de Varnes (Varnes D.J., 1954, 1978), celle de Hutchinson (Hutchinson J. N., 1968; Hutchinson J.N 1988), celle d'EPOCH (EPOCH, 1993) et celle de Dikau (Dikau R. et al., 1996).

Les recommandations du groupe de travail sur l'inventaire des glissements de terrain du monde (*Working Party on World Landslide Inventory- WP/WLI*) (WP/WLI, 1990, 1993) ont défini la notion d'activité en se référant aux conditions spatiales et temporelles, l'état, la distribution et le style. Dans ce concept, le premier terme décrit les informations concernant le moment où le mouvement a eu lieu, permettant une prévision des évolutions, le second terme décrit, d'une manière générale, le glissement de terrain en mouvement, et le troisième terme indique comment il se déplace.

L'une des classifications des mouvements de terrain les plus fréquemment utilisées dans la littérature est celle de Varnes (1978). Il distingue 6 types de mouvements de terrain : les chutes, les glissements, les basculements, les déplacements latéraux, les écoulements et un sixième, complexe qui représente une combinaison de plusieurs types de mouvements de terrain (Tab.1).

Le type de mouvement est souvent suivi du type de matériel, débris (prédominance d'éléments grossiers), sol (prédominance d'éléments fins). Pour la roche, cela correspond simplement au faciès du matériel en place intact avant le déclenchement du mouvement (exemple, une roche calcaire, gréseuse, etc.). Les débris contiennent une grande proportion d'éléments grossiers ; 20 à 80 % des particules sont supérieures à 2 mm tandis que dans les sols (au sens non pédologique) 80 % ou plus des particules sont inférieures à 2 mm, c'est à dire la limite de la taille des sables.

Tableau 1. Classification des mouvements de terrain (Varnes D.J., 1978)

Type de mouvement		Type de matériau		
		Roches	Sols	
			Granuleux	Fins
<i>Chutes (Falls)</i>		<i>Écroulement rocheux (Rock fall)</i>	<i>Écroulement de débris (Debris fall)</i>	<i>Écroulement de terrain (Earth fall)</i>
<i>Basculements (Topples)</i>		<i>Basculement rocheux (Rock topples)</i>	<i>Basculement de débris (Debris topples)</i>	<i>Basculement de terrain (Earth topples)</i>
<i>Glissements (Slides)</i>	<i>Rotation (Rotational)</i>	<i>Affaissement rocheux (Rock slump)</i>	<i>Affaissement de débris (Debris slump)</i>	<i>Affaissement de terrain (Earth slump)</i>
		<i>Masse rocheuse en glissement (Rock block slide)</i>	<i>Débris en glissement (Debris block slide)</i>	<i>Terrain en glissement (Earth block slide)</i>
	<i>Translation (Translational)</i>	<i>Glissement rocheux (Rock slide)</i>	<i>Glissement de débris (Debris slide)</i>	<i>Glissement de terrain (Earth slide)</i>
<i>Déplacements latéraux (spreads)</i>		<i>Déplacement de roche (Rock spread)</i>	<i>Déplacement de débris (Debris spread)</i>	<i>Déplacement de terrain (Earth spread)</i>
<i>Ecoulements (Flows)</i>		<i>Avalanche de roches (Rock flow)</i>	<i>Lave torrentielle (Debris flow)</i>	<i>Coulée de terrain (Earth flow)</i>
<i>Complexes (Complex)</i>		<i>Combinaison d'au moins deux principaux types de mouvements</i>		

3.2. Description des principaux types de mouvements de terrain

Les principaux types de mouvements de terrain sont illustrés par la figure 2 et par les photographies ci-après.

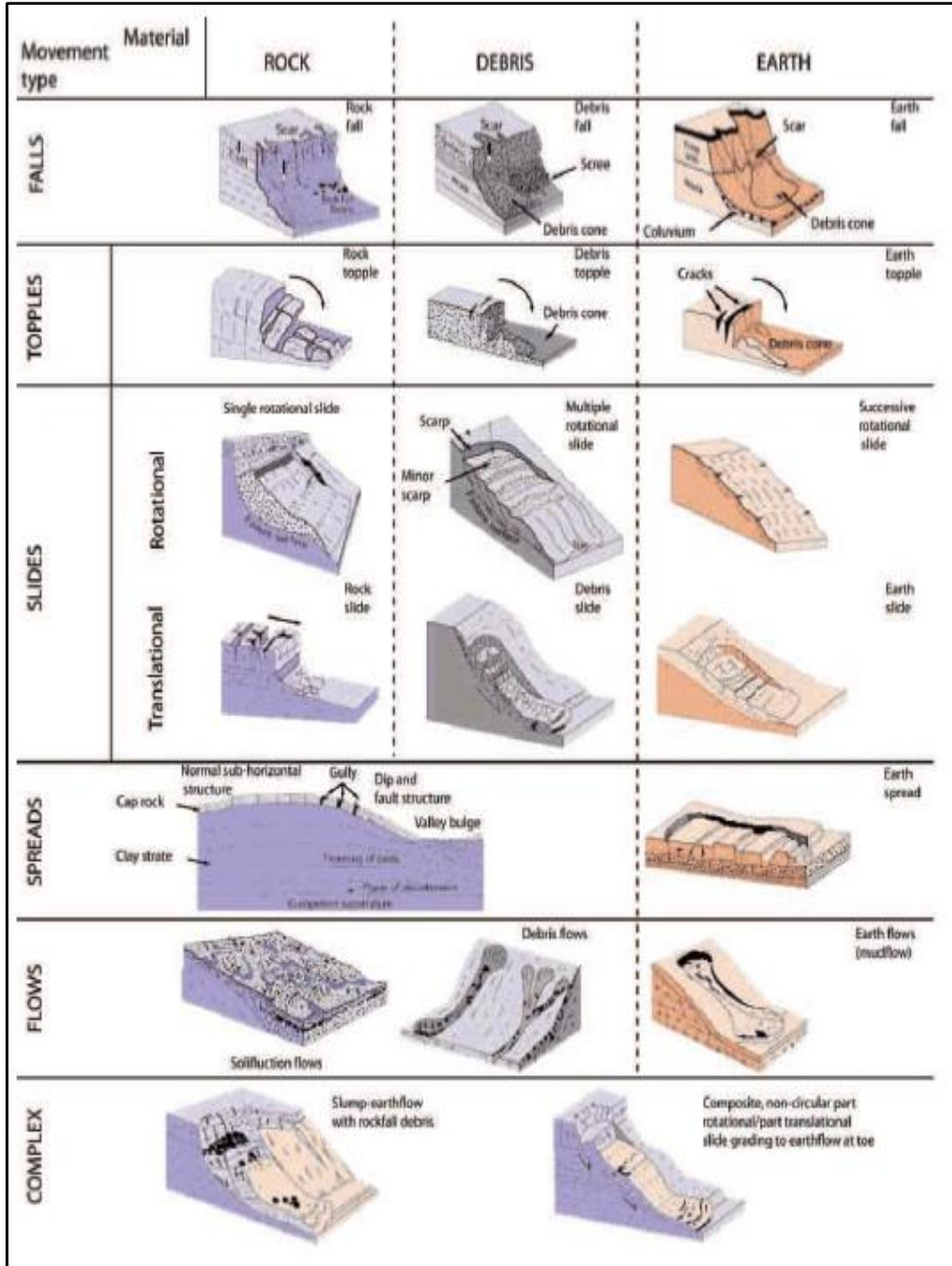


Figure 2. Représentation schématique des principaux types de mouvement de terrain (d'après Varnes, 1978) (Source: [http:// www.bgs.ac.uk](http://www.bgs.ac.uk))

Les **chutes (falls)** se font en grande partie à l'air libre. Le mouvement démarre à partir de détachement de matériel d'une paroi verticale ou fortement inclinée et n'implique généralement pas de déplacement en cisaillement. Elles peuvent être divisées en trois types ; les écroulements rocheux, les écroulements de débris et les écroulements de terrain. (Photo.1)

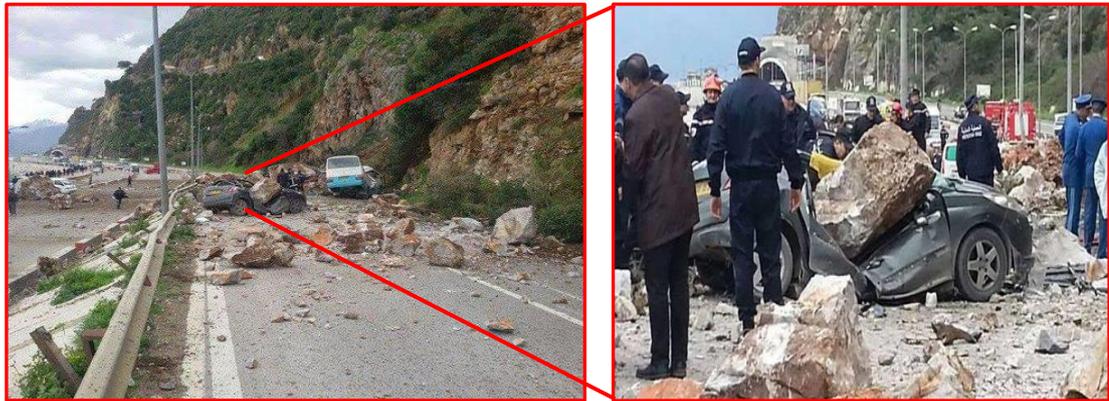


Photo 1. Chute de blocs sur la RN 9 Aokas, Bejaia (Algérie), déclenchée en 2015

Le **basculement (topple)** implique un pivotement du matériel autour d'un axe horizontal perpendiculaire à la pente à l'air libre ou non. Ce type de mouvement est assez proche de la chute, mais se fait généralement sur des pentes moins fortes. Il inclut les « failles panaméennes » des géomorphologues. Le fauchage correspond à un pivotement proche du basculement mais qui affecte la partie superficielle (plus ou moins altérée) de la pente et se manifeste essentiellement par une déformation ductile. (Photo.2)



Photo 2. Basculement corniche calcaire lié au fluage des marnes sous-jacentes, falaises du Bessin, Calvados (1983)

Un **glissement de terrain (slide)** peut être défini sommairement comme le mouvement d'une masse de sol ou de roc le long d'une surface de rupture sous l'effet de la gravité, qui s'amorce essentiellement là où il y a un talus. Le mouvement de la masse est plus ou moins rapide. Selon Maquaire (2002), le glissement de terrain peut être défini comme un mouvement de versant vers l'aval. Il peut affecter soit une masse rocheuse, soit un terrain meuble, le long d'une ou plusieurs surfaces de rupture, ou suivant des zones relativement minces de déformation intense par cisaillement. La plupart du temps, le déclenchement d'un glissement de terrain est conditionné par plusieurs facteurs.

Trois forces vont déterminer l'ampleur du phénomène (Flageollet, 1989) : (i) la gravité : représente la force qui entraîne le matériel vers le centre de la Terre. Elle est dépendante de la pente du terrain, (ii) la force de frottement : représente la force qui freine une couche de terrain meuble ou de roche par frottement contre la couche sous-jacente, (iii) la force de cohésion : représente la force qui repose sur l'attraction des particules du sol entre elles et de l'attraction entre ces particules et l'eau stockée dans le sol. La vitesse, la distance et l'arrêt sont contrôlés par l'équilibre entre la force motrice (la gravité) et les forces de résistance (force de frottement et de cohésion).

Pour simplifier, lorsque les forces de résistance sont plus fortes que la force motrice, le versant reste stable (facteur de sécurité $> 1,5$). Si cet équilibre est inversé, c'est à dire lorsque la force motrice est plus importante, un glissement de terrain se déclenche. Il se produit, alors, une rupture entre deux couches de roche ou de sol entraînant une masse qui se met à glisser avec plus ou moins de vitesse vers l'aval (Flageollet, 1989).

La diversité des glissements de terrain est grande, mais on peut distinguer trois principaux types de glissements de terrain (Flageollet, 1989) :

(i) Les glissements rotationnels (Photo.3) se font le long d'une surface de rupture concave où, du fait de la rotation, la masse glissée reste principalement dans les limites de la zone de rupture. C'est le cas des glissements simples, emboîtés et successifs (Maquaire, 2002). La figure 3A illustre la géométrie classique de ce type de glissement. La zone de départ est caractérisée par une importante rupture de pente qui correspond à l'escarpement principal du glissement. Le corps du glissement, est généralement caractérisé par une topographie bosselée. Il présente le plus souvent des fissures et dans

certains cas, des gradins. La partie aval du glissement, présente quant à elle, une morphologie en forme de bourrelet, résultant de la pression exercée à l'amont et de la forme concave de la surface de rupture. Cette pression déstructure la masse de terrain favorisant une faible limite de liquidité. Le plus souvent, cette partie du glissement évolue en coulée de boue.

(ii) Les glissements translationnels ou plans (Fig.3B ; photo.4) qui se déclenchent à la faveur d'une discontinuité géologique plus ou moins conséquente, généralement plane, dans des matériaux divers qui peuvent être déplacés par translation, loin dans la pente. C'est le cas des glissements de blocs, de sol, rocheux et de débris (Maquaire, 2002). Par rapport au glissement rotationnel, il y a mise en mouvement dès lors que le poids de la masse instable dépasse les forces de friction. Ce type de mouvement peut s'étendre sur plusieurs kilomètres et se produit le plus souvent dans les flyschs et les schistes.

(iii) Certains glissements composites ou complexes montrent une surface de rupture en partie concave et en partie plane; sur d'autres, rotation et translation sont associées.

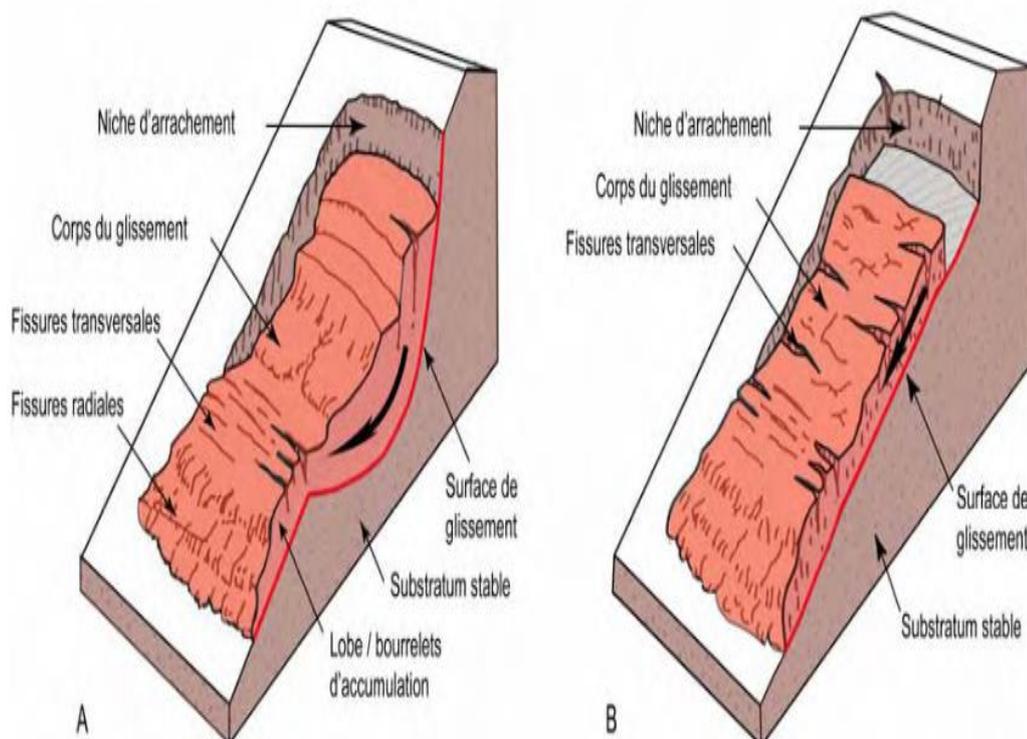


Figure 3. Les principaux détails et unités d'un glissement de terrain rotationnel (A) et translationnel (B) (modifiée d'après Varnes, 1978)



Photo 3. Glissement de terrain sur la route du lac Cecil, Peace River. (Cliché : Couture)



Photo 4 : Glissement rocheux, lac Brazeau, Île de Vancouver. (Cliché : Evans)

Le **déplacement latéral (lateral spreading)** se produit sub-perpendiculairement à la pente avec fragmentation d'un bloc initial et s'accompagne nécessairement d'un glissement vers l'aval. On admet souvent comme déplacement latéral une déformation ductile « en galette » lente de roches tendres.

Les **écoulements (flow)** se traduisent par un déplacement parfois lent mais le plus souvent rapide essentiellement vers l'avant mais aussi latéralement (Photo.5). L'écoulement peut impliquer un ensemble de débris (debris flow) aussi bien qu'un matériel très fin riche en eau. Les écoulements sont les mouvements de terrain les plus dangereux parce qu'une coulée peut se déplacer sur des pentes très faibles, de quelques degrés, même quand les fragments solides représentent 80 à 90 % de sa masse totale. La

vitesse et la distance parcourue dépendent de la nature des matériaux, la quantité d'eau, la viscosité du mélange eau-matériau, la topographie, la saturation en eau des sols sur lesquels elle se déplace.



Photo 5. Coulée boueuse, Autoroute de Taïwan, 2010

3.3. Types d'activité

Les aspects généraux de l'activité d'un mouvement de versants devraient être étudiés et décrits durant la reconnaissance initiale des déplacements du mouvement de terrain et avant que soit entrepris un examen détaillé des matériaux mobilisés. Les termes relatifs à l'âge et à l'état d'activité du mouvement de terrain ont été définis par Varnes (1978) et quelques-uns de ces termes définissant les séquences du mouvement ont été regroupés sous trois aspects principaux :

- **L'état d'activité** dans lequel se trouve le mouvement de terrain ;
- **La répartition de l'activité** qui décrit la direction et le sens du déplacement ;
- **La morphologie** qui précise toute éventuelle combinaison ou succession de mouvement élémentaire dans la zone instable.

3.3.1 L'état d'activité

Les différents états d'activité peuvent être illustrés sur un graphe donnant les déplacements selon le temps (Fig.4) en distinguant successivement les états :

- **Actif (1)** : pour un mouvement de versant qui est actuellement en déplacement, à l'exemple de la figure A qui montre que l'érosion du pied du versant est la cause du déclenchement d'un basculement. Les formes sont fraîches et bien définies ;
- **En suspens (2)** : dans le cas où un déplacement s'est produit dans les 12 mois précédents mais sans activité actuelle. La figure B montre l'existence d'une

fissure de traction visible sur la couronne au-dessus de la zone de basculement.

Les formes sont encore assez fraîches et bien définies ;

- **Réactif (3)** : pour un mouvement actif (1) qui a été en suspens (2) ou inactif (4). La figure C montre qu'un second basculement s'est produit en perturbant les matériaux précédemment déplacés. Les formes sont fraîches et bien définies dans cette partie ailleurs elles sont moins marquées et émoussées ;
- **Inactif (4)** : pour un phénomène qui n'a pas connu de déplacement au cours des 12 derniers mois et qui peut être divisé en état (5) à (8) ;
- ✓ **Latent (5)** : un mouvement de terrain latent est un mouvement inactif (4), mais qui peut être facilement réactivé (3) s'il est soumis aux mêmes causes de déclenchement initiales ou bien à d'autres causes d'instabilité. La figure D montre que la masse déplacée commence à retrouver sa couverture d'arbres (colonisation progressive), les escarpements sont adoucis par les processus de météorisation, ruissellement, etc ;
- ✓ **Naturellement stabilisé (6)** : il s'agit d'un mouvement inactif (4), qui n'est plus affecté par ses causes de déclenchement initiales. La figure E montre que des dépôts fluviaux protègent la base du versant et que l'escarpement commence à être recouvert par une végétation arbustive ;
- ✓ **Artificiellement stabilisé (7)** : il s'agit d'un mouvement inactif (4), qui a fait l'objet de mesures de confortement pour réduire ou mieux annuler l'action des causes initiales de déclenchement. Dans la figure F un mur de protection a été construit pour annuler les effets liés à la suppression de butée créée par érosion du pied de versant ;
- ✓ **Ancien, fossile (8)** : un mouvement de terrain ancien ou fossile est un mouvement inactif (4) qui s'était développé sous des conditions climatiques et géomorphologiques très différentes des conditions actuelles. La figure G montre que les formes du relief sont très estompées et qu'une couverture forestière uniforme a été rétablie. Le terme « éteint » (extinct) est parfois trouvé.

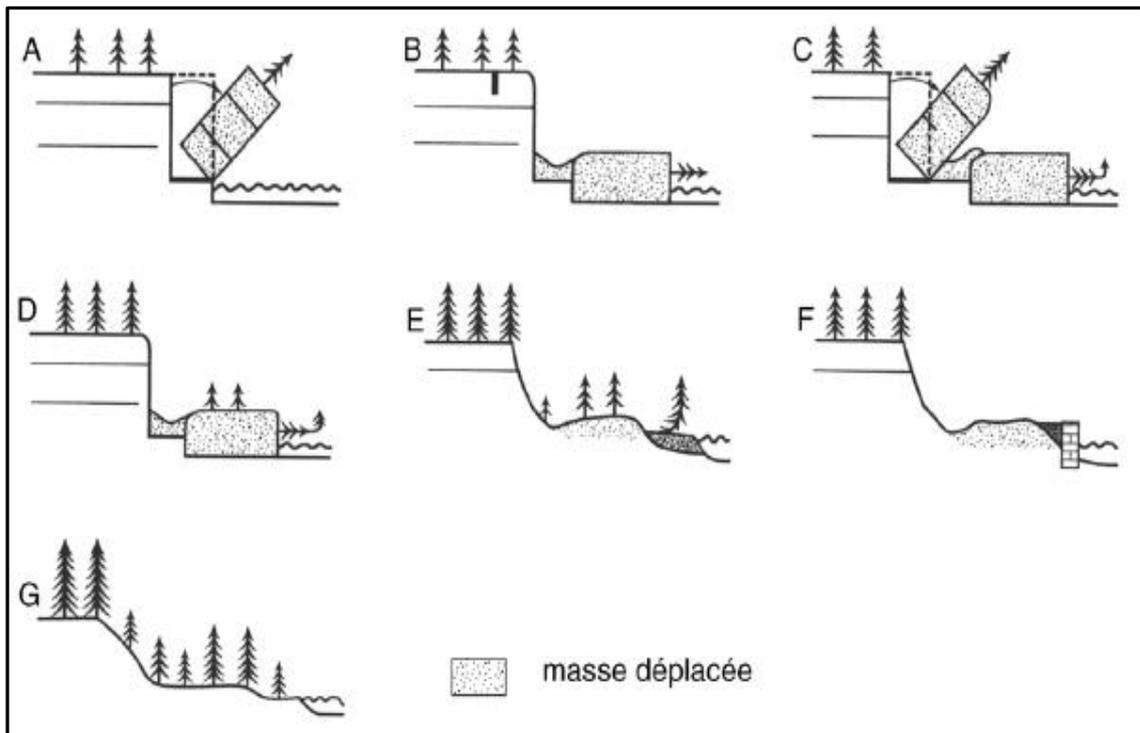


Figure 4. Les différents stades d'activité des mouvements de versants (Dikau, 1996)

3.3.2 Répartition de l'activité

Sept cas différents de répartition ont été retenus (Fig.5).

- **Progressif** : un mouvement de versant est dit progressif (Fig. A) quand la surface de rupture se propage dans la même direction que celle des déplacements de la masse instable vers l'aval ;
- **Rétrogressif** : un mouvement de versant est dit rétrogressif (Fig. B) quand la surface de rupture s'étend dans la direction opposée à celle des déplacements de la masse instable, c'est à dire que l'instabilité se propage vers l'amont du versant ;
- **Bidirectionnel** : un mouvement de versant est dit bidirectionnel (Fig. C) quand la surface de rupture se propage à l'amont et à l'aval avec une augmentation du volume de matériaux déplacés ;
- **Régressif** : dans un mouvement de versant dit régressif (Fig. D), le volume des matériaux déplacés diminue avec le temps ;
- **Limité** : un mouvement de versant est dit limité (Fig. E), quand on note l'existence d'un escarpement à l'amont sans rupture ou changement visible en surface au pied de la masse déplacée. Cela suggère que le déplacement de

- tête crée une compression et un léger gonflement de la partie aval du versant ;
- **En mouvement** : (Fig. F), quand les matériaux déstabilisés continuent à se déplacer sans changement visible de la surface de rupture ou du volume de matériaux ;
 - **En élargissement latéral** : dans le cas où la surface de rupture s'étend à l'un ou aux deux flancs du mouvement de versant (Fig. G).

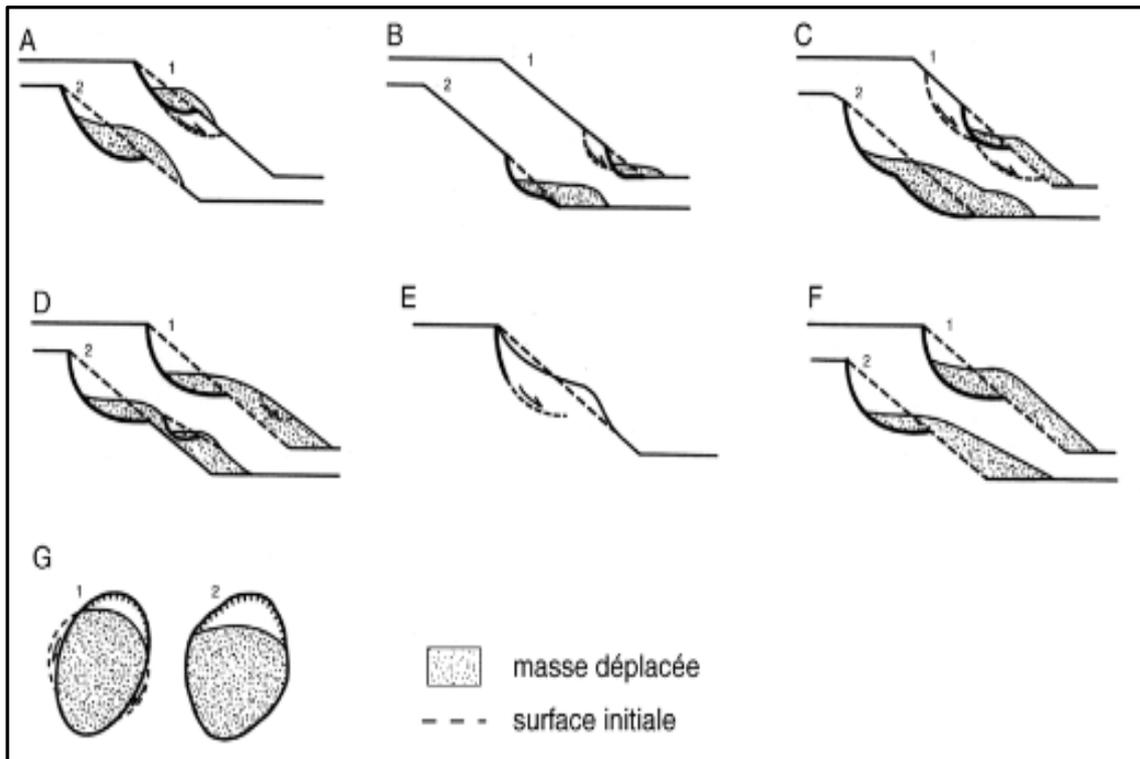


Figure 5. Répartition de l'activité d'un mouvement de versant (Dikau, 1996)

3.3.3 Morphologie

La morphologie des mouvements de versants peut être définie par cinq termes établis par Varnes (1978). La figure 6 montre des profils en travers de mouvements de versant exposés à plusieurs types d'activité.

- **Simple** : un mouvement de versant simple (Fig. A) est affecté par un seul déplacement de matériaux ;
- **Complexe** : un mouvement de terrain est complexe s'il subit au moins deux types de mouvements différents à la suite (en séquence) parmi les cinq types possibles retenus. Dans l'exemple de la figure B, les gneiss et les migmatites subissent un basculement en relation avec l'incision de la vallée. Des dépôts

alluviaux remplissent le fond de la vallée. Après une phase de météorisation qui a fragilisé les matériaux basculés, une partie de la masse glisse ;

- **Composite** : un mouvement de terrain est dit composite s'il subit au moins deux types de mouvements différents parfois simultanément dans différentes parties de la masse déplacée. Dans l'exemple (Fig. C), les calcaires ont glissé sur un inter-lits argileux provoquant un basculement sous la base de la surface de rupture ;
- **Emboîté** : dans le cas de glissements emboîtés, ils sont du même type et très proches, mais indépendants. L'exemple (Fig. D) montre que le dernier glissement AB est du même type que le glissement DC, mais ils n'ont pas déplacé les mêmes matériaux et leurs surfaces de rupture sont distinctes ;
- **Multiple** : les mouvements de versants multiples montrent une répétition d'un même type de mouvement dans l'espace et le temps (Fig. E).

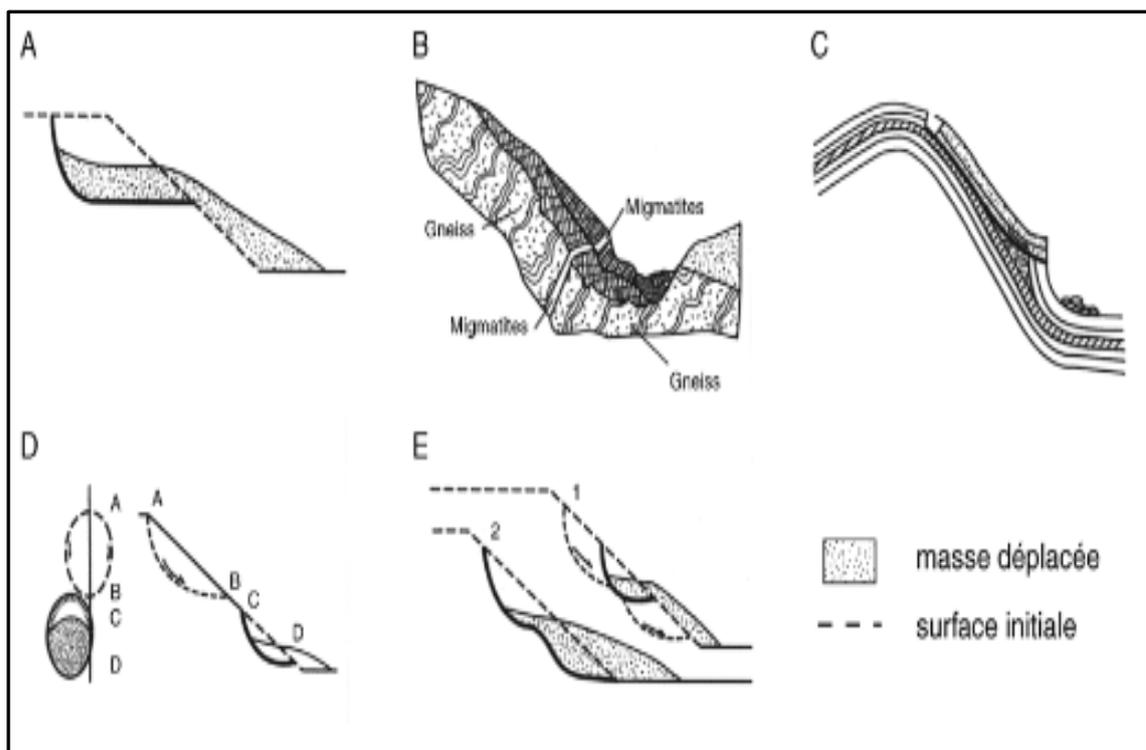


Figure 6. Morphologie d'un mouvement de versant (Dikau, 1996)

3.4. Vitesse des déplacements

A partir des classes de vitesses définies par Varnes (1978), les bornes de ces classes ont été redéfinies en 1994. Pour chacune de ces sept classes de vitesse, des types de

réaction et des impacts significatifs en termes de vies humaines ou de dégâts aux constructions ont été proposés (Tab.2).

Tableau 2. Classes de vitesses définies par Varnes (1978)

Classe	Description	Vitesse
1	Extrêmement lente	moins de 16 mm/an
2	Très lente	de 1,6 m/an à 16 mm/an
3	Lente	de 13 m/mois à 1,6 m/an
4	Modérée	de 1,8 m/h à 13 m/mois
5	Rapide	de 3 m/min à 1,8 m/h
6	Très rapide	de 5 m/s à 3 m/min
7	Extrêmement rapide	plus de 5 m/sec

- **Classe 1** : les mouvements sont imperceptibles sans recours à des instruments de mesures très précis, pas de dommages aux structures construites avec précautions ;
- **Classe 2** : quelques structures permanentes sont sans dommages ou si elles sont fissurées elles peuvent être réparées ;
- **Classe 3** : routes et structures insensibles peuvent être conservées avec de fréquents et lourds travaux de maintenance, si les mouvements totaux ne sont pas trop grands particulièrement pendant la phase d'accélération et les mouvements différentiels sur les marges du glissement sont distribués dans une large zone ;
- **Classe 4** : les structures résistantes peuvent être maintenues en état si elles sont localisées à une courte distance du pied de la masse déplacée ; les structures localisées sur la masse déplacée sont extrêmement endommagées ;
- **Classe 5** : la fuite et l'évacuation sont possibles ; structures, constructions et aménagements sont détruits par les masses déplacées ;
- **Classe 6** : quelques personnes sont tuées en raison des trop grandes vitesses qui ne permettent pas à toutes les personnes de s'échapper ; destruction majeure ;
- **Classe 7** : catastrophe majeure ; les constructions exposées sont totalement détruites et de nombreuses personnes sont tuées par l'impact des matériaux déplacés ou par dislocation des masses déplacées.

4. Cartographie des glissements de terrain

Pour déterminer les risques des glissements de terrain existants et de faire une estimation des futures occurrences, il est nécessaire de comprendre les conditions et les processus qui contrôlent ces glissements de terrain. Une carte d'inventaire des glissements de terrain existants constitue une ressource importante de données de base pour la compréhension de ces conditions et processus.

4.1. Inventaire des glissements de terrain

L'inventaire constitue la forme la plus simple de cartographie des glissements de terrain. Il définit la localisation, la typologie, la classification, l'identification de la taille, du volume, de la date d'occurrence et d'autres caractéristiques des glissements de terrain (Varnes et al., 1984 ; Carrara et al., 1991 ; Hutchinson & Chandler, 1991 ; Dikau, 1996 ; Guzzetti et al., 1999). Ceci constitue la première étape de l'analyse qui peut constituer une première approche de la susceptibilité.

Les inventaires de glissements de terrain peuvent être réalisés avec une large gamme de méthodes :

- L'analyse d'archives historiques (Helluin, 1987 ; Cuesta et al., 1999 ; Salvati et al., 2009) ;
- La cartographie géomorphologique de terrain (Mahieu et al., 1977 ; Brunsten, 1985) ;
- Les méthodes issues de la télédétection telles que l'interprétation d'images multispectrales haute résolution, l'interprétation d'images radar (SAR, Synthetic Aperture Radar), ou l'analyse de MNT-LIDAR à très haute résolution (Van Den Eeckhaut et al., 2006 ; Lissak, 2012) ;
- L'interprétation d'images aériennes (Porcher & Guillope, 1979 ; Parise, 2001 ; Guzzetti et al., 2012).

L'analyse des informations historiques de l'occurrence des glissements de terrain constitue une source importante dans la cartographie de la susceptibilité, aléa et de risque des glissements de terrain, car elle donne un aperçu sur la fréquence du phénomène, les types, les volumes et les dommages qui ont été causés. Les cartes d'inventaire de glissements de terrain, provenant des archives historiques, la collecte de

données sur le terrain, des interviews et l'interprétation des images sont essentielles pour la cartographie de l'aléa glissement de terrain. L'utilisation des données historiques dans l'évaluation des risques naturels est discutée par plusieurs chercheurs : (Guzzetti et al., 1994 ; Bozzano et al., 1996 ; Guzzetti, 2000 ; Glade, 2001).

Généralement, les méthodes couramment utilisées pour faire une carte d'inventaire des glissements de terrain sont les enquêtes de terrain et les techniques de télédétection. Par des enquêtes de terrain, les preuves de l'existence des glissements de terrain dans le passé et dans le temps actuel peut être déterminées à partir de la morphologie des pentes, des dépôts sédimentaires, ou des instabilités déclarées (par exemple les arbres penchés). Puisque ce type de preuves se détériore ou s'efface progressivement avec le temps, le soin doit être pris pour déterminer les tendances à long terme de l'occurrence.

Les techniques de télédétection aident considérablement dans l'enquête sur les glissements de terrain, à l'échelle locale et régionale. Ces techniques ne peuvent pas remplacer le travail de terrain, mais elles offrent un outil supplémentaire à partir duquel nous pouvons extraire des informations sur les causes et l'occurrence de ce phénomène. Les informations des glissements de terrain extraites à partir des techniques de télédétection sont principalement liées à la morphologie, la végétation et des conditions hydrologiques des pentes. Quelques bases de données de télédétection pour la cartographie des glissements de terrain sont : *Landsat* (Honda et al., 2002), *Spot* (Yamaguchi et al., 2003), *IRS-1* (Nagarajan et al., 1998), *ASTER*, *IKONOS* ou *Quickbird* (Petley et al., 2002), *LIDAR* (Van Den Eeckhaut et al., 2006).

Les méthodes photogrammétriques utilisant des photos aériennes sont aussi très utiles pour l'identification des glissements de terrain. Ces méthodes sont maintenant devenues la procédure standard qui peut être réalisée par la plupart des groupes de recherche. En outre, la comparaison des photographies aériennes d'une zone peut donner une indication de la fréquence et l'ampleur des glissements de terrain. Lors de l'utilisation de ces photographies, il est important d'utiliser des photos de différentes époques, car souvent le développement des sols peut montrer la présence de glissements de terrain. Examinant les différentes périodes, les causes de glissements de terrain peuvent être détectées et évaluées. Chandler et Moore (1989), Chandler et Brunsten (1995) et Fookes et al. (1991) donnent d'excellentes applications de photogrammétrie aérienne pour la détection des glissements de terrain.

4.2. La susceptibilité aux glissements de terrain

La susceptibilité aux glissements de terrain est une composante importante dans l'équation de ce type de risque, celle-ci étant définie comme la probabilité d'occurrence du phénomène dans un certain secteur. Son évaluation suppose l'appréciation quantitative et qualitative de la classification, du volume, de la superficie et de la distribution spatiale des glissements de terrain qui existent et/ou qui peuvent apparaître (Fell et al., 2008).

4.2.1. Principes de base

Malgré la divergence de vues entre les experts, toutes les méthodes proposées pour les études de la susceptibilité aux glissements de terrain sont basées sur des principes ou hypothèses largement acceptées (Varnes, 1984; Carrara et al., 1991; Hutchinson et Chandler, 1991; Guzzetti et al., 1999; Guzzetti et al., 2005), à savoir :

- *Les principales conditions qui provoquent des glissements de terrain peuvent être identifiées, et la plupart d'eux peuvent être cartographiées.* En fait, les facteurs de contrôle des glissements de terrain peuvent être reconnus, classés, hiérarchisés, évalués et cartographiés par différentes méthodes (Varnes, 1978; Hansen, 1984; Hutchinson, 1988; Cruden et Varnes 1996; Dikau, 1996; Guzzetti et al., 2005).
- *Pour les glissements de terrain, "le passé et le présent représentent la clé de l'avenir"* (Varnes, 1984; Carrara et al., 1991). Selon cette hypothèse, les glissements de terrain dans l'avenir sont susceptibles de se produire dans les mêmes conditions géologiques, géomorphologiques et hydrologiques que celles qui ont conduit à des glissements de terrain dans le passé. Ainsi, une bonne compréhension des événements passés est essentielle dans l'évaluation des risques « glissement de terrain » (Varnes, 1984; Carrara et al., 1991; Guzzetti et al., 1999; Guzzetti, 2005).
- *Les conditions qui conduisent à des glissements de terrain peuvent être utilisées pour déterminer l'occurrence de futurs glissements.* Certains auteurs (Crozier, 1986; Hutchinson, 1988; Dietrich et al., 1995; Guzzetti, 2005) ont confirmé que les conditions qui provoquent les glissements de terrain (facteurs d'instabilité) d'une manière directe ou indirecte, peuvent être collectées et utilisées pour

construire des modèles prédictifs de l'évènement glissement de terrain, parce que les glissements de terrain sont contrôlés par des lois mécaniques qui peuvent être déterminées empiriquement, statistiquement ou de façon déterministe.

Généralement, l'évaluation de la susceptibilité de glissement de terrain et de sa cartographie devrait être dérivée de l'ensemble de ces hypothèses. Le non-respect de ces dernières va limiter la pertinence de toute évaluation de la susceptibilité, quelle que soit la méthode utilisée dans la recherche (Guzzetti, 2005). Le degré de fiabilité des cartes de susceptibilité aux glissements de terrain est influencé par plusieurs facteurs, comme la précision, la quantité et la qualité des données acquises, l'échelle de travail, la méthodologie et la modélisation.

4.2.2. Échelle de cartographie

L'échelle de travail de la cartographie de la susceptibilité et de l'aléa mouvements de terrain dépend essentiellement de trois facteurs (Aleotti et Chowdhury, 1999):

- L'objet de l'étude;
- L'étendue de la zone d'étude;
- La disponibilité des données.

Le tableau 3 résume les différentes échelles d'analyse pour l'aléa mouvements de versant. Les cartes de susceptibilité aux glissements de terrain devraient être préparées à une échelle appropriée afin de montrer les informations requises à un niveau de zonage particulier. Cependant, dans la pratique l'échelle de la cartographie peut être limitée par l'échelle des cartes topographiques disponibles.

Tableau 3. Les différentes échelles d'analyse pour l'aléa mouvements de versant (d'après, Maquaire, 2002 ; Van Westen et al., 2008)

Echelle	Valeur indicative	Taille indicative de la zone d'étude
Nationale	+ ou - 1/1.000.000 ^{ème}	Pays et/ou région (> 10 000 km ²)
Régionale	1/100.000 ^{ème} à 1/500.000 ^{ème}	Région (de 10000 à 10 00 km ²)
Moyenne	1/25.000 ^{ème} à 1/100.000 ^{ème}	Bassin versant (de 1 000 à 100 km ²)
Large	1/5.000 ^{ème} à 1/25.000 ^{ème}	Bassin versant ou versant (de 100 à 10 km ²)
Locale	Du 1/5.000 ^{ème} au 1/1.000 ^{ème}	Versant ou site instable (<10 km ²)

4.2.3. Méthodes pour la cartographie de la susceptibilité

La cartographie de la susceptibilité définit la localisation et la caractérisation des mouvements de versant identifiés sur le site d'étude, ainsi que l'estimation des zones pouvant potentiellement être affectées dans le futur. Elle concerne principalement les zones "sources" des mouvements de versant (zones de rupture) et intègre parfois des informations sur les zones pouvant être touchées par la propagation et/ou la régression des mouvements. Les zones potentiellement soumises à la rupture et les zones soumises à la propagation / régression des mouvements sont généralement analysées de manière indépendante. La susceptibilité ne tient pas compte de la fréquence des mouvements de versant (probabilité annuelle), ni de leur intensité (volume et magnitude potentielle). (Mărgărint et al., 2011)

On observe dans la littérature une multiplication des travaux dédiés aux glissements de terrain. Les approches visant l'impact potentiel de ces glissements, par l'élaboration des cartes de susceptibilité, sont signalés dès les années 1970 (Brabb & Pampeyan, 1972 ; Kienholz, 1978). Récemment, les études méthodologiques visant la réalisation de telles cartes se sont multipliées en bénéficiant de la généralisation des systèmes géo-informatiques, de l'augmentation spectaculaire des sources d'acquisition des données spatiales par l'intermédiaire des images satellitaires et du développement des modèles statistiques pour expliquer et prévoir les phénomènes naturels (Van Westen, 2008).

Certains chercheurs ont appliqué de nombreuses méthodes pour évaluer la susceptibilité, l'aléa et le risque « glissement de terrain » à travers le monde. Un aperçu sur les différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité et de risque glissement de terrain sont données par Brabb (1984), Varnes (1984), Hansen (1984), Carrara et al. (1995), Hutchinson (1991), Soeters et van Westen (1996), Aleotti et Chowdhury (1999), Guzzetti et al. (1999), Gorsevski et al. (2003), Huabin et al. (2005), Kanungo et al. (2009) et Safaei et al. (2011).

Selon le degré de subjectivité introduit dans l'analyse, trois approches peuvent être distinguées. On trouvera dans la littérature (Soeters et van Westen, 1996 ; Leroi, 1996 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Van Westen, 2008 ; Dai & Lee, 2001 ; Van Westen et al., 2003 ; Van Westen et al., 2006) :

- **L'approche qualitative** fondée sur l'opinion de l'expert en charge de l'évaluation ;
- **L'approche semi-quantitative** qui tend à diminuer la part de subjectivité liée à l'expert ;
- **L'approche quantitative** basée sur des critères de pondération "*objectifs*", mettant en relation les phénomènes observés et les facteurs de prédisposition cartographiés.

a) L'approche qualitative

L'approche qualitative repose sur l'opinion de l'expert en charge de l'évaluation de l'aléa. En principe, les informations sont collectées sur le terrain avec l'aide de photographies aériennes et à travers des documents existants (cartes topographiques, cartes géomorphologiques, cartes géologiques...). En outre, les technologies spatiales sont de plus en plus utilisées (Petley et al., 2002 ; Barlow et al., 2003 ; Van Westen, 2004 ; Van Westen et al., 2006). La cartographie d'inventaire, ainsi que les approches expertes (ou heuristiques) font partie des méthodes qualitatives.

L'inventaire des glissements constitue la source d'information de base de toute analyse spatiale permettant de calibrer et / ou valider les modèles (Guzzetti et al., 1999). Même si celui-ci n'est pas directement nécessaire à la construction des modèles (exemple des modèles déterministes), les informations sur la localisation des

phénomènes permettent une validation du pouvoir prédictif des résultats (Santacana et al., 2003 ; Beguería, 2006 ; Guzzetti et al., 2006). Ce type de cartes se contente de faire un état des lieux de la localisation des glissements de terrain et ne propose pas d'informations sur la localisation potentielle d'autres phénomènes (Chacón et al., 2006 ; Fell et al., 2008 ; Kanungo et al., 2009).

L'approche experte ou *heuristique* constitue un second type d'approche qualitative. Dans ce cas, la localisation potentielle de la susceptibilité ou de l'aléa est basée sur la connaissance a priori et l'expérience locale (ou par analogie avec des cas similaires) d'un expert en charge de l'étude. Les approches expertes sont basées sur l'utilisation de données spatialisées pour la localisation des zones potentiellement instables (pente, géologie, hydrologie, géomorphologie, géotechnique, occupation du sol etc.). Ces données sont acquises au travers de campagnes de terrain, de l'analyse d'images aériennes ou peuvent être directement disponibles.

L'expert pondère ainsi les différents facteurs sur la base de sa propre expérience. La méthode de cartographie peut être **directe**, l'expert définit manuellement les limites de différentes zones potentiellement stables ou instables (Van Westen, 2000 ; Van Westen et al., 2003). Il peut également avoir recours à des applications sous SIG (**systèmes d'analyse hiérarchique** ou **cartes d'index**) permettant d'attribuer un poids à chacun des facteurs de prédisposition représentés par différentes couches thématiques. Celles-ci sont ensuite automatiquement combinées (Stevenson, 1977; Saaty, 1980 ; Abella & Van Westen, 2008 ; Malet et al., 2009).

b) L'approche semi-quantitative

D'autres méthodes, telles que les *logiques floues* sont considérées comme des méthodes semi-quantitatives. Après "*fuzification*" des variables (transformation des facteurs de prédisposition sur une échelle de 0 à 1 fonction de leur importance dans le processus), celles-ci sont pondérées entre elles par des opérateurs flous (AND, OR, SUM, PRODUCT, GAMMA). Cette méthode permet de formaliser des règles définies par l'expert. Elle garde la souplesse de l'approche experte, mais elle est considérée comme plus objective par le cadre formaliste qu'elle impose à son application (Poiraud, 2012). De nombreux exemples d'application des logiques floues à la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de versant peuvent être trouvés, entre autres, dans

Bonham-Carter (1994), Ercanoglu & Gokceoglu (2002), Pradhan (2011). D'autre part, certains *systèmes d'analyse hiérarchique (AHP)* peuvent être considérés comme un autre type de méthodes semi-quantitatives, notamment les systèmes de combinaison par paires (Saaty, 1980 ; Saaty & Vargas, 2001).

Saaty (1980) a proposé la méthode « **Analytic Hierarchy Process (AHP)** », utilisée dans cette étude, qui est une méthode assez simple dans son principe et dans sa mise en œuvre, ce qui explique peut-être le nombre assez important de publications scientifiques qu'elle a déclenché. La résolution de problème selon la méthode AHP est l'analyse multicritère la plus répondue parce qu'elle accompagne le décideur dans la méthodologie de formulation de son problème et en particulier parce qu'elle propose une méthode d'évaluation des paramètres d'importance. Elle a déjà été utilisée avec succès par plusieurs chercheurs (Pourghasemi et al., 2012 ; Kayastha et al., 2013 ; Park et al., 2013). Elle procède par combinaisons binaires de chaque niveau de la hiérarchie par rapport aux éléments du niveau supérieur. Les raisons de sa popularité sont :

- Unités de mesures : Qualitatives et quantitatives, valeurs relatives ou absolues pour établir des priorités ;
- Structure hiérarchique : Trie des éléments d'un système dans différents niveaux et dans des groupes à caractéristiques similaires ;
- Interdépendance : Permet de considérer l'interdépendance des éléments d'un système sans insister sur le raisonnement linéaire ;
- Consistance : Permet de garder une consistance logique des jugements utilisés pour déterminer les priorités ;
- Synthèse: Permet d'obtenir une appréciation générale de la désirabilité de chaque alternative ;
- Identification des priorités: Permet de considérer la priorité relative de chaque critère pour ainsi obtenir la meilleure alternative selon les objectifs identifiés ;
- Unicité: Sa flexibilité permet son utilisation dans un éventail varié de problèmes non structurés. Cette méthode a été utilisée dans des domaines aussi variés que le conflit du Moyen Orient (1972), la planification du transport au Soudan (1973-1975), la planification d'un institut de recherche (1977), les prix du pétrole en 1990 (1980), une exploration minière en Mauritanie (1976), l'achat

d'un véhicule, le choix de systèmes de production dans des industries et plusieurs autres.

Le point de départ de la méthode est de définir une arborescence hiérarchique de critères et de sous critères. Chaque critère doit être identifié avec sa définition et son intensité. Il faut en effet que la somme des poids de tous les critères fils d'un même critère père, soit égale à 1.

Cette expression des poids est appelée relation d'interdépendance. La détermination des poids des facteurs se fait une fois que la hiérarchie complète du problème est posée. On va comparer deux à deux les différentes branches de même niveau, en attribuant une note chiffrée à la façon dont on ressent la différence entre les deux critères. Ainsi on dispose de toute cette échelle de valeurs pour remplir une matrice de jugements, qu'on notera A dans les formules mathématiques. Id la matrice identité d'ordre n , n étant le nombre d'actions prises en compte dans l'étude. On va ensuite, une fois cette matrice remplie, normaliser par colonne cette matrice (on additionne les valeurs d'une même colonne, puis on divise chaque nombre de la colonne par cette somme). Puis on calcule la moyenne arithmétique des nombres sur chaque ligne. Chaque ligne correspondant à un critère, la moyenne associée au critère définit le poids du critère relativement au critère père. La valeur « globale » du poids d'un critère en bout d'arbre est le produit de tous les poids aboutissant à ce critère.

Initialement, Saaty avait proposé une méthode basée sur les valeurs propres λ de la matrice des jugements. Ainsi, il avait montré que la valeur propre maximale λ_m du problème de recherche des valeurs propres ($\det(A - \lambda I_d) = 0$) était réelle, et supérieure à la taille de la matrice. Puis, en résolvant le système $AV = \lambda_m I_d V$ (V étant un vecteur propre de A), et en ajoutant la condition que la somme des poids doit être égale à 1 ; il en tirait les mêmes valeurs des poids que celles obtenues par la technique précédente. La cohérence des résultats doit également être vérifiée. Pour chacune des matrices d'évaluation A , on peut calculer un indice de cohérence. Pour une matrice donnée, on retient sa valeur propre maximale λ_m . L'Indice de Cohérence CI d'une matrice $n \times n$ est : $CI = \lambda_m - n / n - 1$. Le Ratio de Cohérence est ensuite calculé en utilisant la formule $CR = CI / IA$, où IA est un indice de cohérence obtenu par un grand nombre de simulations. On va maintenant déterminer le poids à accorder à une action. Pour cela, on va considérer un critère en bout d'arbre, et faire des comparaisons, entre toutes les actions,

du point de vue de ce critère. On peut ensuite attribuer une note globale à chaque action, en calculant la moyenne pondérée des notes obtenues par les actions. Il ne reste plus qu'à ranger ces notes pour obtenir un classement final des actions.

Pour résumer les étapes à suivre de la méthode AHP on peut citer les étapes suivantes :

- Étape 1 : Décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique ;
- Étape 2 : Effectuer les combinaisons binaires ;
- Étape 3 : Déterminer les priorités ;
- Étape 4 : Synthétiser les priorités ;
- Étape 5 : Cohérence des jugements.

Étape 1 : Décomposer le problème complexe en une structure hiérarchique :

- Définir l'objectif cible (niveau 0)
- Définir les critères de décision ou d'analyse (niveau 1)
- Définir les caractéristiques des critères, chacun à son tour, ou l'ensemble d'options sous étude (niveau 2). Le dernier niveau de la hiérarchie comprendra les différentes solutions alternatives, choisies préalablement.
- Saaty recommande de limiter le nombre de critères ou alternatives pertinentes à 7 au plus.
- Une analyse fonctionnelle du projet à évaluer, tel que préconisée dans le plan de travail de la méthode de l'Analyse de la valeur peut s'avérer très utile pour identifier les critères d'évaluation à insérer dans la structure hiérarchique.

Étape 2 : Effectuer des combinaisons binaires :

- Comparer l'importance relative de tous les éléments appartenant à un même niveau de la hiérarchie pris deux par deux, par rapport à l'élément du niveau immédiatement supérieur.
- Configurer une matrice carrée réciproque formée par les évaluations des rapports des poids ($K \times K$), K étant le nombre d'éléments comparés. On obtient de cette façon :

$$a = a_{ij} \text{ avec } a_{ij} = 1 \text{ et } a_{ji} = 1/a_{ij} \text{ (valeur réciproque)}$$

Les valeurs a_{ij} sont déterminées à l'aide de l'échelle présentée dans le tableau 4.

Tableau 4. L'échelle de comparaison de Saaty (Saaty, 1980)

Echelle numérique	Echelle verbale
1	Importance égale des deux éléments
3	Un élément est un peu plus important que l'autre
5	Un élément est plus important que l'autre
7	Un élément est beaucoup plus important que l'autre
9	Un élément est absolument plus important que l'autre

Etape 3 : Déterminer les priorités

- Calculer l'importance relative de chacun des éléments de la hiérarchie à partir des évaluations obtenues à l'étape précédente
- La détermination des priorités des éléments de chaque matrice se fait par la résolution du problème de vecteurs propre
- L'importance relative des différents critères est exprimée par les valeurs du vecteur propre normalisé à 1.0 plus grande est cette valeur et plus important est le critère correspondant.

Etape 4 : Synthétiser les priorités**Etape 5 :** La cohérence des jugements

Les réponses obtenues présentent souvent un certain degré d'incohérence. AHP n'exige pas que les jugements soient cohérents ni transitifs, par contre Saaty a défini un indice de cohérence (IC). Plus l'indice de cohérence devient grand et plus les jugements de l'utilisateur sont incohérents et vice versa. IC est ensuite comparé à des valeurs critiques obtenues par simulation. Saaty a défini, par expérimentation, un ratio de cohérence comme le rapport de l'indice de cohérence calculé sur la matrice correspondant aux jugements du décideur et de l'indice aléatoire (IA) d'une matrice de même dimension (Tab.5).

Tableau 5. Détermination de l'Indice Aléatoire (Saaty, 1980)

Nombre de critères (N)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IA	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

Le ratio de cohérence est donné par la formule suivante :

$$RC = IC / IA$$

Avec :

RC: Ratio de cohérence ;

IA : Indice aléatoire ;

IC : l'indice de cohérence.

Le ratio de cohérence peut être interprété comme la probabilité que la matrice soit complétée aléatoirement. La cohérence globale d'appréciation est évaluée au moyen de ce ratio de cohérence RC. Toujours selon Saaty, la valeur de ce dernier doit être au plus égale à 10%. Dans le cas où cette valeur dépasse 10%, les appréciations peuvent exiger certaines révisions.

c) *L'approche quantitative*

Par opposition aux méthodes expertes, les *approches quantitatives* sont basées sur des critères de pondération "*objectifs*", théoriquement reproductibles, produisant des résultats identiques avec les mêmes jeux de données. Ces méthodes incluent les *approches statistiques*, les *approches probabilistes*, *l'intelligence artificielle*...etc.

Au sein de ces méthodes, les *approches probabilistes* sont les plus utilisées. Celles-ci analysent les relations statistiques entre la localisation des phénomènes (passés et présents) et un jeu de données spatialisées représentant les facteurs de prédisposition (pente, géologie, occupation du sol, exposition des versants, etc.). Sur la base de cette relation, une densité de phénomènes peut être calculée permettant de dériver des pondérations. Une analyse probabiliste peut être *bivariée* ou *multivariée* :

○ *Méthodes bivariées*

Les méthodes bivariées reposent sur le calcul de la densité de phénomène par facteur. Chaque facteur ou chaque combinaison spécifique de facteurs peut être individuellement analysé. En utilisant les valeurs normalisées (densité de phénomènes par classes reportées sur la surface totale du site) une carte finale de susceptibilité peut être obtenue par l'addition des facteurs pondérés. Les méthodes les plus couramment utilisées sont la **méthode de susceptibilité** (*landslide susceptibility method*) (Brabb,

1984 ; Van Westen, 1993), la **méthode de pondération de l'infirmité** (*information value method*) (Yin & Yan, 1988 ; Saha *et al.*, 2005) et la **théorie de l'évidence** (*Weight of Evidence*) (Van Westen, 1993 ; Bonham-Carter, 1994 ; Lee *et al.*, 2002 ; Süzen & Doyuran, 2004 ; Neuhäuser & Terhorst, 2007).

La **méthode de pondération de l'infirmité**, utilisée dans cette étude, est introduite en 1988 par Yin et Yan. Elle repose sur la densité de phénomène par facteur. Les pondérations sont obtenues par le logarithme de la densité par facteur divisée par la densité sur la surface totale (Melo *et al.*, 2012, équation.1). Une fois les pondérations sont calculées, on procède à l'addition des facteurs selon des règles expertes établies : soit on additionne un à un les facteurs pour connaître l'influence de chacun sur la future localisation des phénomènes, soit on additionne tous les facteurs en une seule fois estimant que chacun est indispensable. Mathématiquement, cette technique se formule pour un facteur X :

$$L_i = S_i/N_i / S/N \dots\dots\dots [Eq.1]$$

Si est le nombre d'unités homogènes (cellules ou surface des unités de pente) comportant un ou des phénomène (s) en présence du facteur X, N_i est le nombre de cellules ou la surface des unités de pentes pour le facteur X_i , S le nombre total de cellules ou la surface totale des unités de pentes pour les phénomènes, N est le nombre total de cellules ou la surface totale des unités de pentes pour le site d'étude.

○ **Méthodes multivariées**

L'approche multivariée a été développée par Carrara *et al.* (1977) puis reprise par Carrara *et al.* (1991, 1995, 1999), Guzzetti *et al.* (1999, 2006), Reger (1979), Ayalew & Yamagishi (2005). Le concept de calcul est différent des techniques bivariées : les méthodes multivariées analysent la contribution relative de chaque facteur à l'occurrence des mouvements de versant à l'intérieur des unités de terrain homogènes (Carrara *et al.*, 1995). Les calculs sont fondés sur la présence ou l'absence de phénomènes pour chaque unité de terrain. Plusieurs techniques ont été utilisées, les plus communes étant les **techniques discriminantes** et les **techniques de régressions multiples** (Van Westen, 1993). Actuellement, les **régressions logistiques** leur sont préférées (Van Westen *et al.*, 2006 ; Ayalew & Yamagishi, 2005). Dans la majorité des

cas, le scientifique a recours à des logiciels statistiques externes au *SIG* pour pouvoir calculer les contributions de chaque facteur et obtenir des valeurs de susceptibilité.

Plus récemment, de nouvelles méthodes, principalement issues de *l'intelligence artificielle* sont également utilisées pour la cartographie de la susceptibilité tels que les **réseaux de neurones** (Lee *et al.*, 2003 ; Ermini *et al.*, 2005 ; Ercanoglu, 2005), les **arbres de décision** (Yeon *et al.*, 2010 ; Nefeslioglu *et al.*, 2010) ou les **machines à vecteur de support** (Yao *et al.*, 2008 ; Xu *et al.*, 2012). Par exemple les réseaux de neurones fonctionnent sur le principe de pondération par apprentissage progressif (rétropropagation). L'objectif est d'ajuster les poids via une multitude d'itérations, en considérant les erreurs entre les valeurs obtenues et l'objectif espéré (reconnaissance des glissements) (Lee *et al.*, 2003).

4.2.4. Le rôle des logiciels de Système d'Information Géographique (SIG)

Les *Systèmes d'Information Géographique (SIG)* ont permis de développer de nouvelles techniques de cartographie de la susceptibilité. Fondées sur des algorithmes statistiques (méthodes bivariée, multivariée, méthodes combinant différentes approches), ces méthodes permettent de s'affranchir de la subjectivité liée à l'expert. Elles mettent en relation les glissements de terrain et des variables prédictives (les facteurs de prédisposition) pour obtenir des cartes de susceptibilité (Van Westen, 1993 ; Carrara *et al.*, 1995 ; Soeters *et van Westen*, 1996 ; Van Westen *et al.*, 2003 ; Chung *et al.*, 2003 ; Van Westen, 2004 ; Van Westen *et al.*, 2006). Les logiciels de Système d'Information Géographique (SIG) permettent de produire l'information, de l'organiser, de la représenter et de l'interpréter. D'abord, ils permettent d'exploiter les données existantes, ainsi que la création d'un inventaire des glissements à partir de l'observation des orthophotos. De plus, ils rendent possible la production d'informations à partir de données, comme, par exemple, le calcul de l'inclinaison des pentes à partir des courbes de niveau. Puis, une fois toutes les variables créées, organisées et géoréférencées, elles peuvent être représentées. Enfin, la superposition de ces informations peut être exploitée.

5. Conclusion

Au regard de la bibliographie, nous avons noté ce qui suit :

- L'exposé des différentes familles de mouvements de pente, nous a permis de conclure qu'elles jouent un rôle primordial dans une perspective de gestion de l'aléa naturel. Ainsi il faut noter l'importance de la cinématique du développement de la rupture et du déplacement des masses rompues où l'eau joue très souvent un rôle majeur.
- La cartographie de la susceptibilité aux mouvements de versant a fait de grands progrès par l'application d'approches utilisant les SIG. Par exemple, les approches statistiques et probabilistes ont été optimisées pour l'échelle régionale et moyenne. Elles n'ont de raison d'être qu'en fonction des données dont on dispose, données en quantité comme en qualité, et demandant des structurations élaborées et informatisées. Face à ces points de blocage, l'introduction de l'opinion experte dans les approches statistiques, considérées comme objectives, reste toujours simple et pratique.

Le site d'étude est présenté en détail dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Description de la zone d'étude

1. Introduction

Les raisons suivantes justifient le choix de cette région pour cette étude :

- C'est l'une des régions les plus affectées par ce type de mouvements ;
- Cette région voit son nombre d'habitants croître d'année en année. Le nombre d'enjeux étant augmenté, la vulnérabilité et par conséquent le risque, le sont aussi.
- La construction sur les zones instables dans cette région a augmenté à cause d'une extension importante dès la période coloniale française jusqu'à ce jour.

2. La région de Constantine : Un contexte climatique et morphostructural particulier

2.1. Localisation géographique

Constantine occupe une position géographique centrale dans l'Est algérien. C'est une région charnière entre le tell et les hautes plaines, au croisement des grands axes Nord-Sud (Skikda-Biskra) et Est-Ouest (Annaba-Sétif).

Localisée au cœur du Nord-Est algérien, la wilaya de Constantine se situe entre la latitude $36^{\circ} 00'$ à $36^{\circ} 35'N$ et la longitude $6^{\circ} 00'$ à $7^{\circ} 00'E$. Elle se trouve à 437 Km de la capitale Alger. Elle est limitée par la wilaya de Skikda et Jijel au Nord, Oum El Bouaghi au Sud, Guelma à l'Est et Mila à l'Ouest (Fig.7). Constantine est un centre urbain à forte concentration humaine, elle s'étale sur une superficie totale d'environ $2\,197\text{ km}^2$ et se caractérise par une population résidente de plus de 938 475 habitants, donnant une densité de 427 habitants/ km^2 . (ONS, 2008).

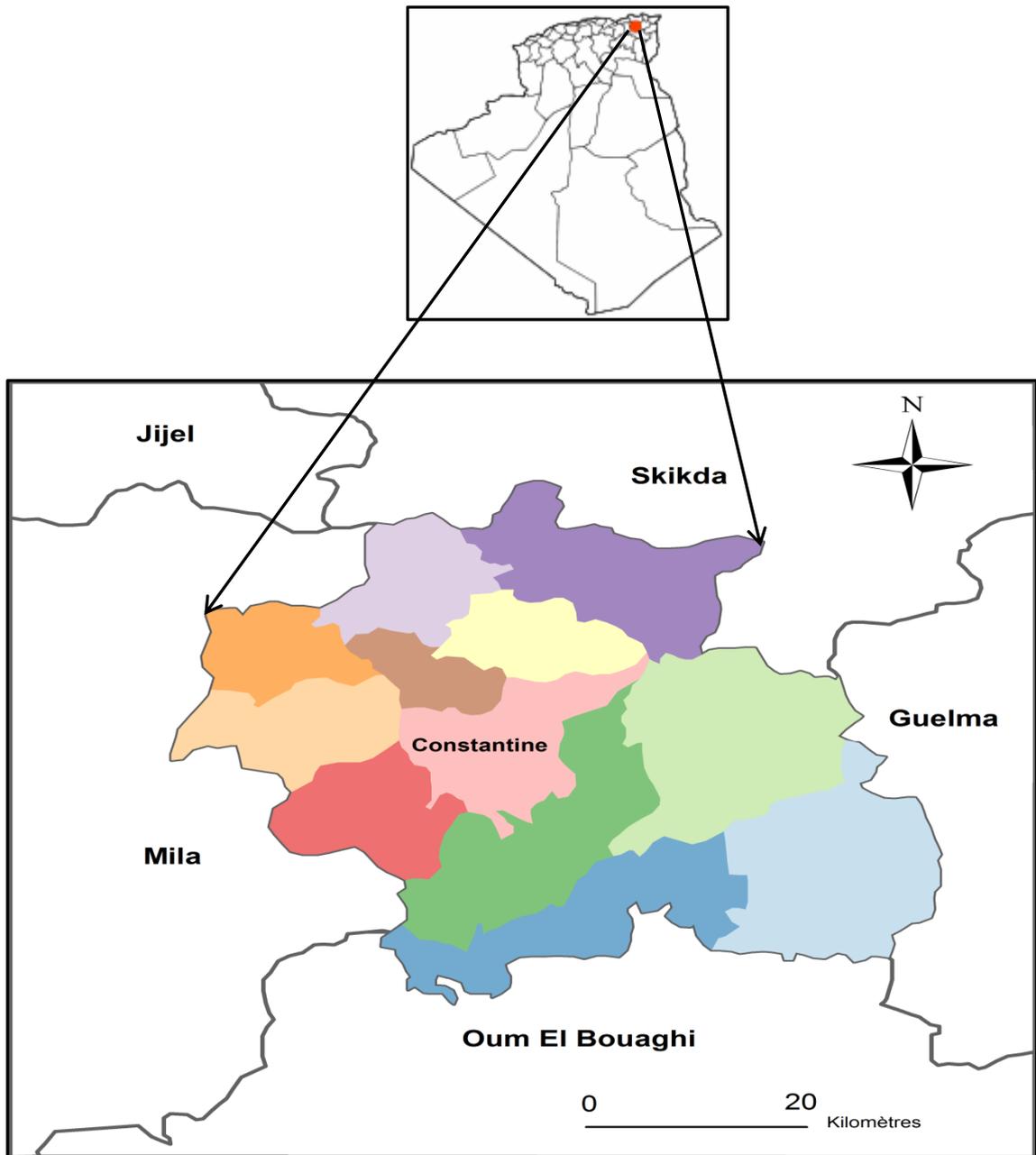


Figure 7. Situation géographique de Constantine

2.2. Climat

La plupart des glissements de terrain ont eu lieu durant les saisons de pluies (pluies torrentielles). L'eau est l'un des principaux facteurs aggravants et déclenchants de l'instabilité des pentes car il participe à la modification des conditions d'équilibre des sols. Ainsi, une période de sécheresse provoque des fissurations par retrait des sols argileux superficiels, ce qui facilite l'infiltration de l'eau dans ces fissures lors des périodes pluvieuses. Par conséquent, pour analyser les caractéristiques climatiques de la

région d'étude, nous avons considéré deux éléments importants : **précipitations** et **température**. L'étude des données de précipitations et de température provenant de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et de l'Organisme National de la Météorologie (ONM), successivement, pour les périodes (1968-1994) et (2001-2010), ainsi que la cartographie des données climatiques dans le Nord-Est algérien permettra de connaître et apprécier les caractéristiques hydro-climatologiques du site étudié.

2.2.1. Précipitations

Constantine est située dans une zone dont les pluies annuelles sont comprises entre 500 et 700 mm (Fig.8).

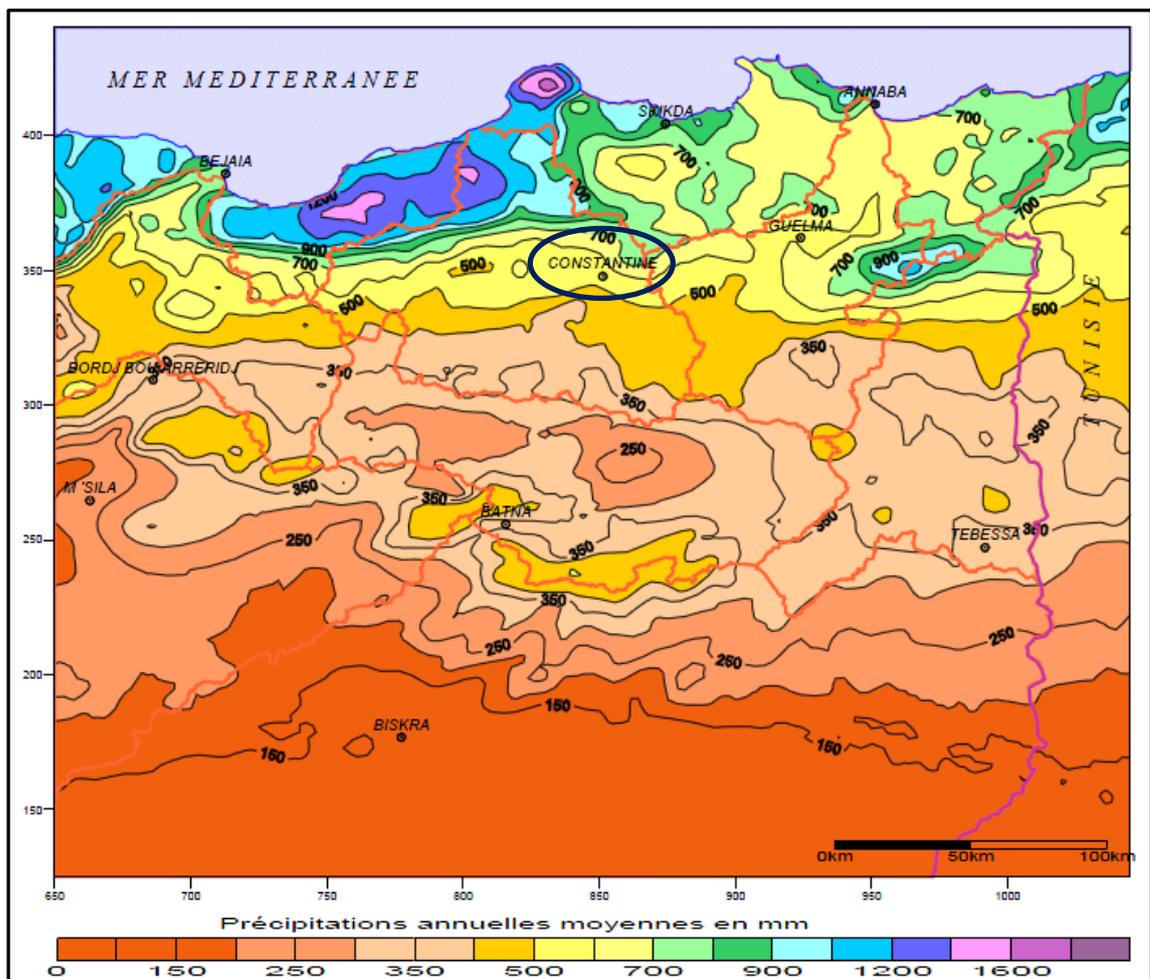


Figure 8. Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (établie d'après A.N.R.H., 1993 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989) (citée par Mebarki ,2005).

Les histogrammes (Figs.9 et 10) mentionnent respectivement les variations annuelles et mensuelles des précipitations de la station de Djebel El Ouahch pour la période (2001-2010). L'analyse de la figure 9 permet de constater que la pluviométrie maximale (767.6 mm) est marquée pour l'année 2003, tandis que la valeur minimale est enregistrée en 2005 avec 325.5 mm. Les précipitations moyennes annuelles montrent une grande variabilité pluviométrique entre les années pluvieuses et les années sèches. Constantine reçoit une moyenne mensuelle de 57.47 mm ; cependant, la distribution de cette tranche est irrégulière comme la figure 10 l'indique. Les maximums des pluies sont enregistrés dans le mois de janvier, novembre et décembre ; alors que les mois de juillet et août ne reçoivent que de faibles quantités. La figure 11 montre globalement une répartition décroissante des précipitations du Nord vers le Sud.

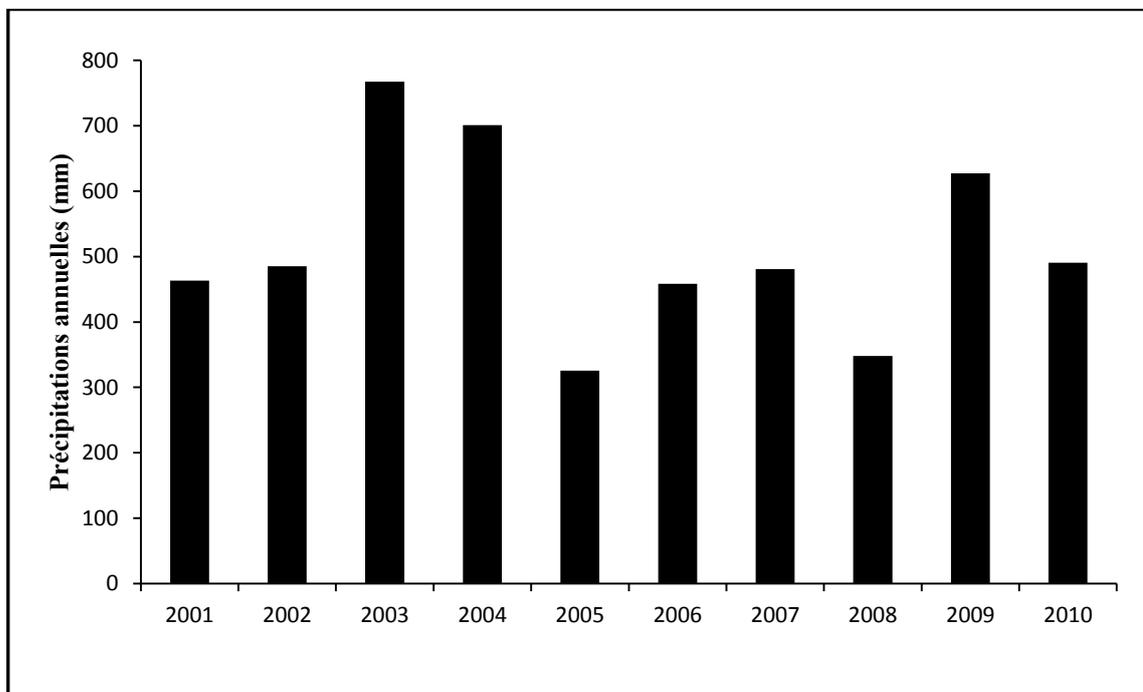


Figure 9. Variations annuelles des précipitations à Constantine (d'après, ONM)

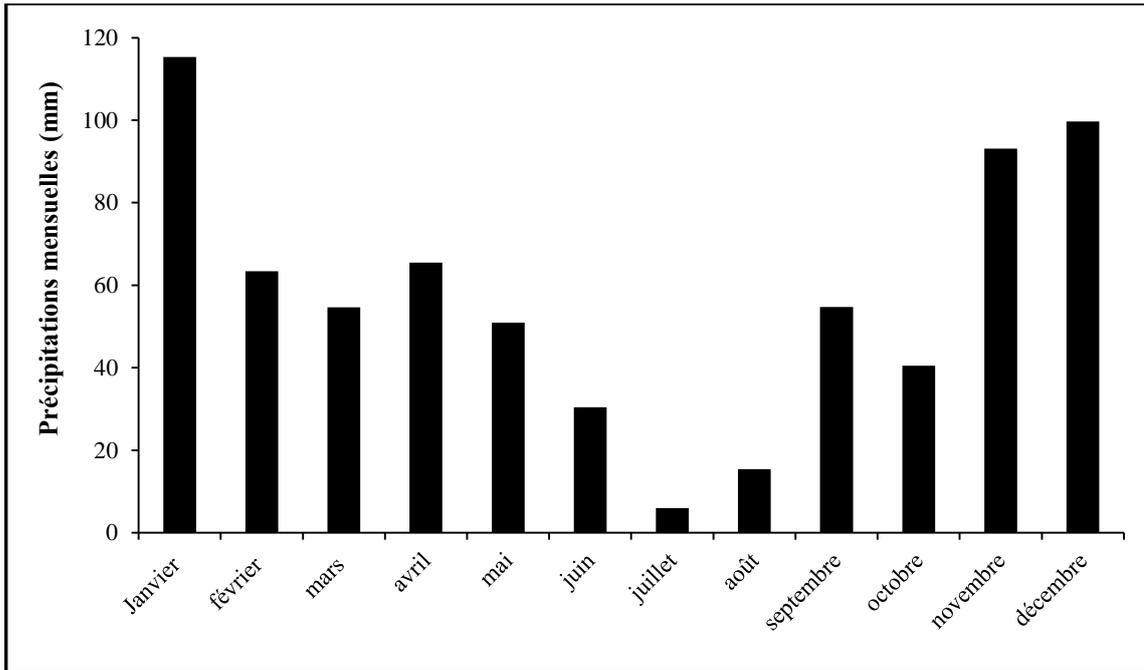


Figure 10. Variations mensuelles des précipitations à Constantine (d'après, ONM)

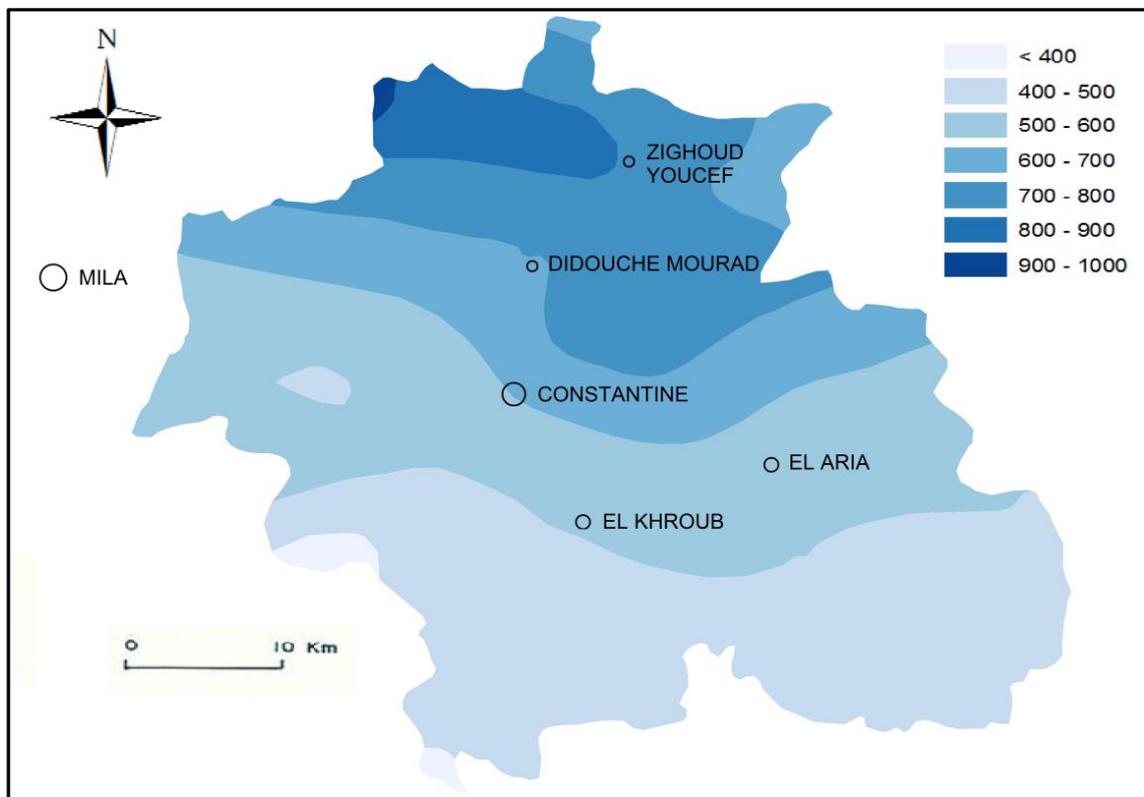


Figure 11. Carte pluviométrique de la wilaya de Constantine (modifiée, d'après : ANRH, 1993)

2.2.2. Température

La température constitue avec les précipitations l'élément majeur qui régit le climat d'une région. C'est bien évident que les contrastes importants de température (écart considérable de température) entre le jour et la nuit a un effet négatif sur le comportement des roches. En effet, les contrastes importants de température entraînent la désagrégation mécanique de ces roches.

L'analyse de la figure 12 permet de donner les constatations suivantes :

- La température moyenne annuelle est de 15 °C. La température moyenne mensuelle de novembre à avril est inférieure à cette valeur, par contre elle est supérieure à ce seuil pour la période qui s'étale de mai à octobre. Donc, nous avons deux saisons thermiques bien marquées.
- Les minimas absolus de température montrent que 6 mois sur 12 ne dépassent guère 10 °C avec cependant un pic de 18 °C en août. En revanche les maximas sont plus importants et la valeur extrême atteint 32 °C durant les mois de juillet et d'août.

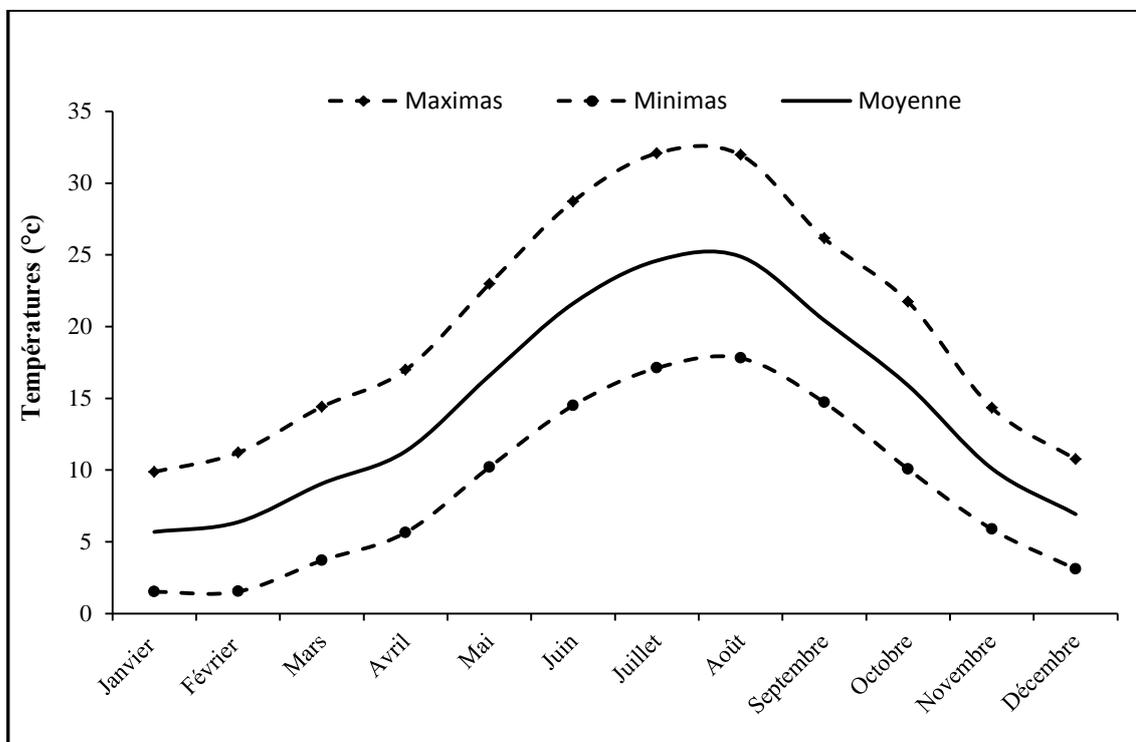


Figure 12. Normales des températures à Constantine, station de Djebel El Ouahch (ONM, 2004)

La combinaison des précipitations et des températures caractérise un régime climatique à dominance « méditerranéenne ». La région de Constantine est soumise à l'influence de ce type de climat caractérisé par des précipitations irrégulières et une longue période de sécheresse. Les cinq grands types de bioclimat méditerranéen sont : humide (pluviométrie annuelle P supérieure à 900 mm, forte humidité de l'air), subhumide ($P > 600$ mm environ), semi-aride ($300 - 350 < P < 550 - 600$ mm, net déficit hydrique), subaride ($P < 350$ mm, nombre de mois secs $>$ nombre mois humides) et aride ($P < 150$ mm, 12 mois biologiquement secs) (Mebarki, 2005). D'après la carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (Fig.13), établie par Côte (1998), Constantine appartient au domaine bioclimatique semi-aride frais.

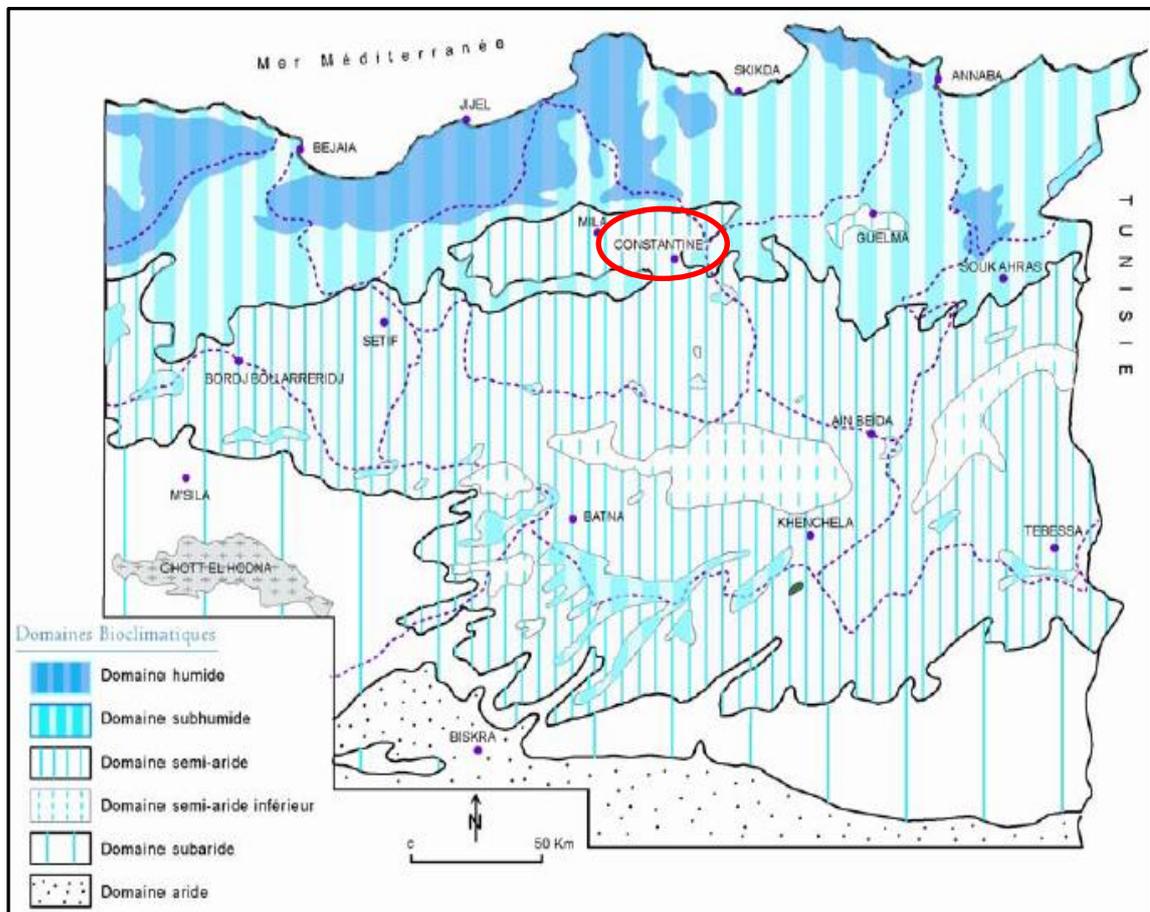


Figure 13. Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (établie d'après Côte M, 1998) (citée par Mebarki, 2005)

2.3. Morphologie

La topographie des terrains est l'un des principaux facteurs d'apparition des glissements de terrain. Constantine s'étale sur un terrain caractérisé par une topographie très accidentée, marquée par une juxtaposition de plateaux (600 à 700 m d'altitude), de collines, de dépressions et de ruptures brutales de pentes donnant ainsi un site hétérogène, responsable de l'instabilité des terrains (Figs.14 et 15). La région de Constantine peut être divisée en trois zones distinctes :

- La zone montagneuse, située au Nord, constitue le prolongement de la chaîne tellienne. Elle est dominée par le mont de Chettaba et le massif de Djebel El Ouahch. À l'extrême nord, le mont de Sidi Driss culmine à 1 364 m d'altitude.
- Les bassins intérieurs, sont constitués d'une série de dépressions qui s'étend de Ferdjioua (wilaya de Mila) à Zighoud Youcef et limitée au Sud par les hautes plaines ; cet ensemble est composé de basses collines entrecoupées par les vallées du Rhummel et de Bumerzoug.
- Les hautes plaines sont situées au sud-est de la wilaya entre les chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien, elles s'étendent sur les communes d'Aïn Abid et Ouled Rahmoune et au-delà .

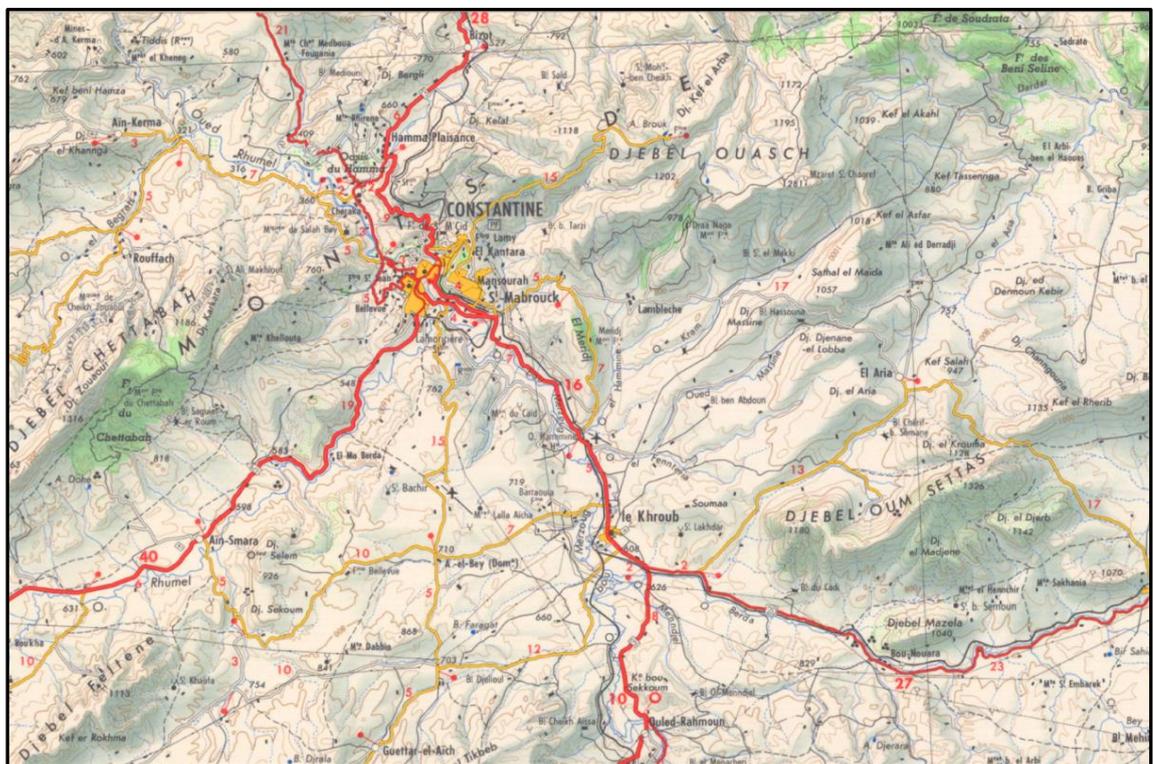


Figure 14. Extrait de la carte topographique au 1/200 000 de la région de Constantine

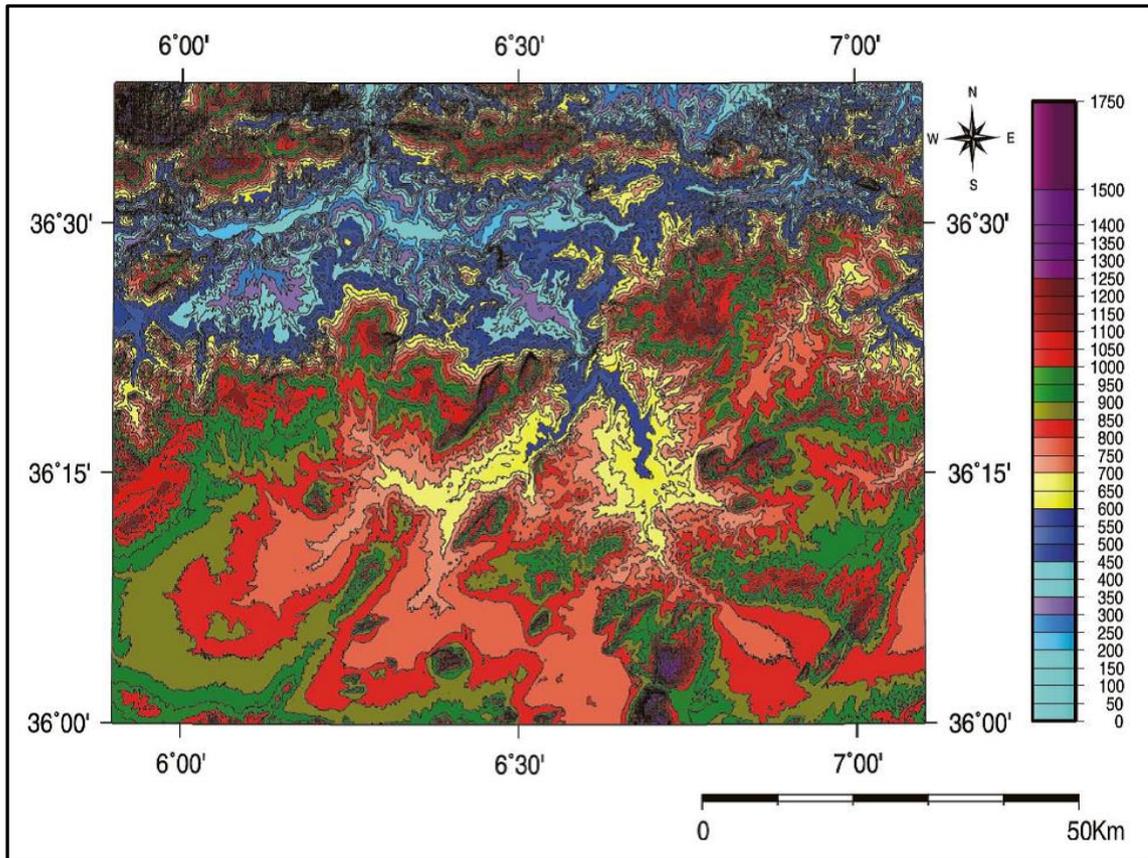


Figure 15. Carte hypsométrique de la région d'étude (Citée par Bouedja, 2010)

2.4. Contexte géologique

La région d'étude fait partie de la chaîne Alpine de l'Algérie nord orientale. Cette dernière constitue un tronçon des chaînes plissées d'Afrique du nord, les Maghrébides, qui vont du Rif (Maroc) à la Sicile (Italie) en passant par l'Algérie et la Tunisie (Auboin et Durand Delga, 1971) (Fig.16). Cette chaîne est caractérisée par les nappes de charriage mises en place au cours des phases tectoniques alpines. La structure géologique de cette chaîne est issue de deux unités morpho structurales génétiquement différentes, la chaîne alpine proprement dite (chaîne des Maghrébides) au Nord et la chaîne atlasique au Sud. Ces deux chaînes sont séparées de la plateforme saharienne par l'accident sud-atlasique (Raoult, 1974) (Fig.17).

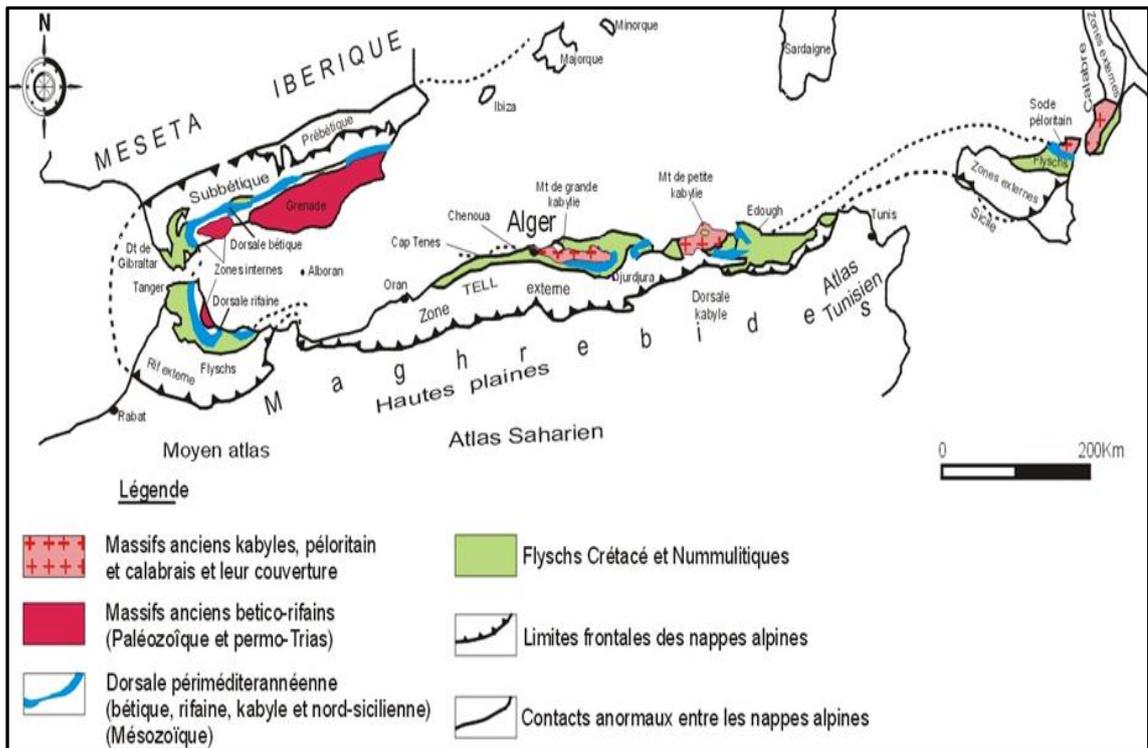


Figure 16. Les grands domaines d'origine alpine en méditerranée occidentale (modifiée, d'après : Durand-Delga, 1969)

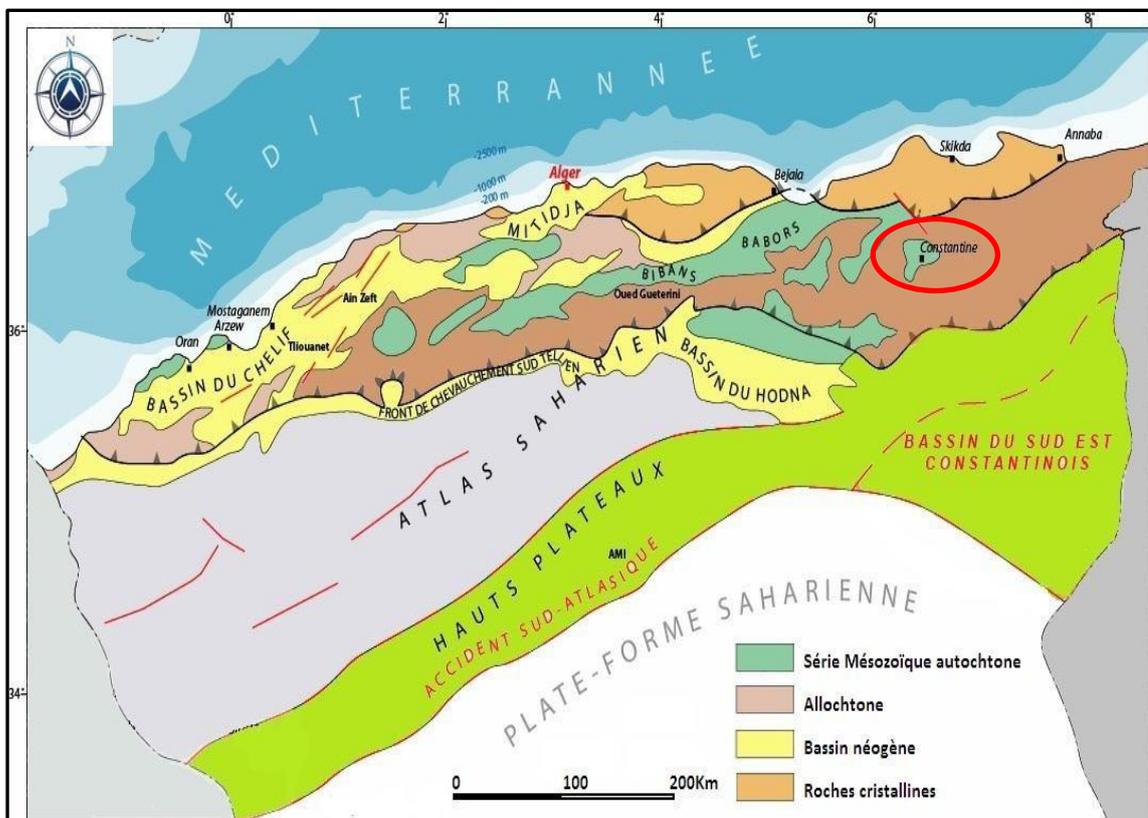


Figure 17. Les principaux domaines structuraux du Nord algérien.

2.4.1. La chaîne littorale

C'est l'organisation allochtone de la chaîne alpine (Fig.18), elle est matérialisée par l'empilement des unités tectono-stratigraphiques suivantes :

- *Le domaine interne*

Il se caractérise par l'abondance des terrains métamorphiques qui constituent notamment les régions kabyles. Il donne des affleurements qui forment d'Ouest en Est les massifs du Chenoua, de Grande Kabylie et la région d'El-Kantour, au Nord de Constantine. Des formations sédimentaires, essentiellement carbonatées, formées en eau peu profondes, et d'âge secondaire à tertiaire, reposent sur ce socle métamorphique, on les désigne généralement sous le nom de chaîne ou dorsale Kabyle (Bouillin, 1977).

- *Le domaine des flyschs*

Formé par des nappes du flysch mauritanien au Nord et du flysch massylien au Sud. Il est caractérisé par des sédiments de type flysch, c'est-à-dire des roches détritiques en séquences grano-classées, déposés du Crétacé inférieur jusqu'au Miocène inférieur, dans des bassins en voie de déformation et de subsidence. La lithologie de ces flyschs est très variable, allant des sédiments fins (pélites) jusqu'à des conglomérats grossiers. Ces flyschs constituent actuellement de grandes nappes de charriage.

- *Le domaine externe*

Les sédiments s'y sont déposés dans un sillon où ils constituent des séries épaisses marneuses et marno-calcaires. Ces sédiments déformés par les phases tectoniques du tertiaire se présentent sous forme d'un empilement complexe de nappes de charriage qui résultent du morcellement des séries selon plusieurs surfaces de décollement.

Les séries suivantes constituent le détail de ce domaine, ce sont du Nord au Sud :

- Les séries ultra-telliennes : le terme ultra-tellien a été proposé par Durand Delga, (1969). Ces séries sont composées de marno-calcaires à faune pélagique de mer peu profonde, avec tout ou partie des termes suivants, déposés du Crétacé à l'Eocène.
 - ✓ Marno-calcaires à Ammonites pyriteuses de l'Hautérivien-Barrémien ;
 - ✓ Marnes et calcaires fins de teintes claires de l'Aptien-Albien au Maestrichtien ;
 - ✓ Calcaires francs, surtout durant l'Eocène inférieur.

Ces séries se sont déposées sur la bordure septentrionale du sillon tellien et sont surtout caractérisées par des faciès pélagiques de teintes claires (jaune et crème), d'âge Crétacé à Eocène.

Les séries telliennes sensu-stricto correspondent à la partie centrale du sillon tellien.

Ces formations reposent tectoniquement, au Sud sur les séries méridionales à Nummulites et l'avant-pays para-autochtone. Au Nord, elles sont chevauchées par les séries ultra-telliennes. Glangeaud, (1951) définit ces formations comme étant des séries épaisses à dominance marneuse et marno-calcaire issues du sillon tellien. Leur couleur est en général grise à gris-sombre, et parfois noire ; et leur teneur en carbonates est comprise entre 20 et 30 %, en général.

Elles forment les paysages caractéristiques du Nord de la région de Sétif, connus sous le nom de nappe de Djemila. Elles affleurent aussi largement à l'Est de Constantine, plus spécialement dans la région de Guelma.

- Les unités méridionales à nummulites, à faciès néritique prépondérant du Crétacé supérieur à l'Éocène.

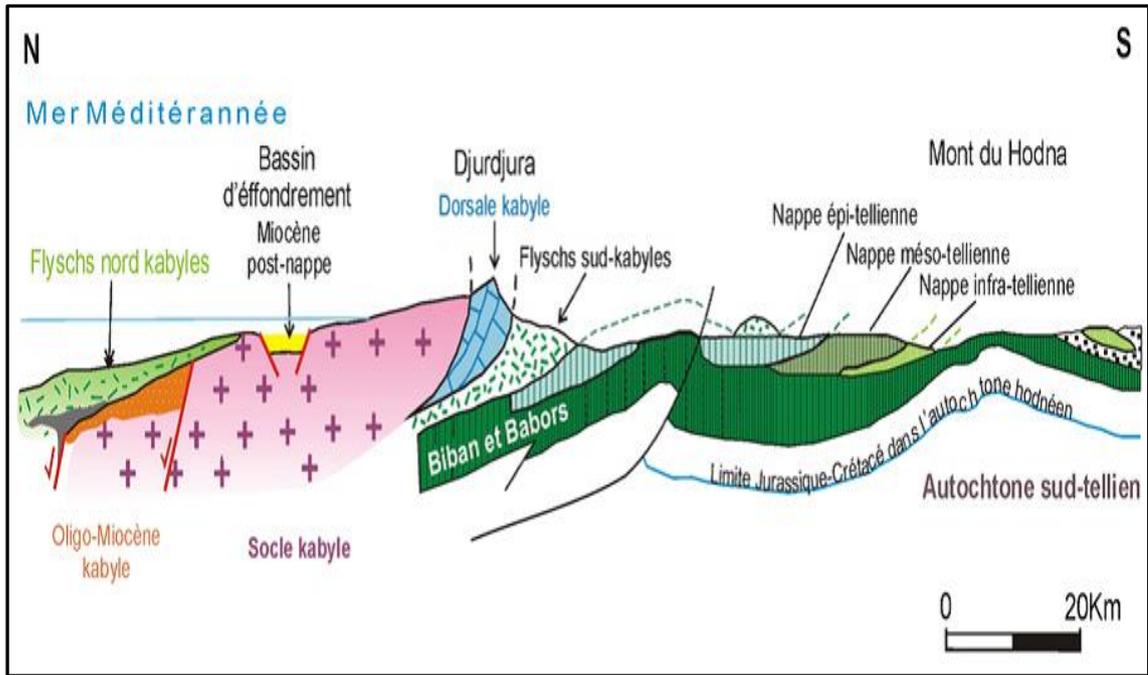


Figure 18. Les grands ensembles de l'édifice structural alpin de l'Algérie du nord oriental (modifiée, d'après : Durand Delga et Fontboté, 1980).

2.4.2. L'ensemble de l'avant pays (séries Atlasiques)

La chaîne tellienne est bordée, au Sud, par des avant-pays de nature et de comportement tectonique variables. Les domaines de l'avant pays sont orientés suivant la direction sud-ouest nord-est. On peut considérer successivement d'Est en Ouest les unités suivantes (Vila, 1980) :

○ *Unité néritique Constantinoise*

Les séries néritiques constantinoises forment des massifs isolés, de taille variable ; caractérisées principalement par d'épaisses séries carbonatées du Mésozoïque, cette unité est considérée comme autochtone (Durand Delga, 1969 ; Chadi, 1991 ; Coiffait, 1992) et pour Vila (1980), elle est allochtone et chevauche les écaillés de Sellaoua et les unités Sud- Sétifienne (Fig.19).

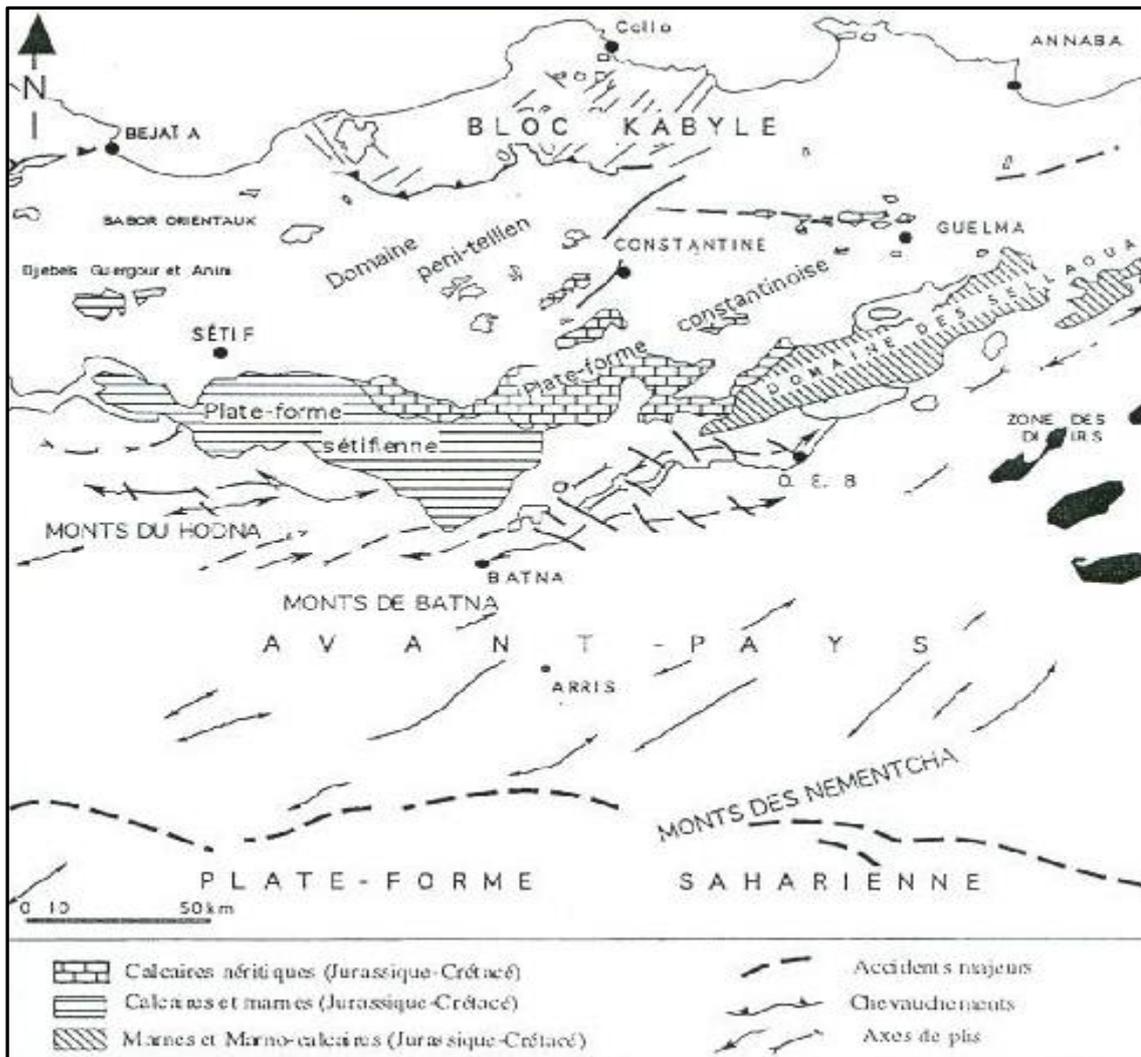


Figure 19. Situation de l'unité néritique constantinoise par rapport aux domaines des zones externes de la chaîne alpine d'Algérie nord-orientale (modifiée, d'après : Bureau ,1970 ; Vila, 1980)

○ *Unités sud- Sétifiennes*

Ces unités considérées par Savornin, (1920) comme « bâti pré-saharien », ont été décrites par Vila, (1980) sous l'appellation « ensemble allochtone Sud-Sétifien ». Elles sont caractérisées par des séries Mésozoïques de type plates-formes subsidentes qui admettent des intercalations gréseuses à leurs limites méridionales.

○ *Unités des Sellaoua*

Ces unités sont issues d'un sillon subsidiant allongé du sud-ouest au nord-est. Elles affleurent au sud-est des massifs composant l'unité néritique Constantinoise et comprennent essentiellement des terrains marno-calcaires Crétacés avec un léger apport

détritique dans le Crétacé supérieur. Le Paléocène et le Lutétien supérieur sont marneux, par contre l'Yprésien est carbonaté et riche en Nummulites. L'écaillage de ces séries est attribué à des raccourcissements considérables ayant provoqué des chevauchements de grandes ampleurs.

○ *L'avant- pays autochtone*

Les séries d'avant pays atlasique sont représentées d'Ouest en Est par les monts du Hodna, les monts de Batna et le massif de l'Aurès. L'avant pays atlasique se distingue par des séries Mésozoïques très épaisses. La sédimentation reste très homogène et se caractérise par des faciès de plateforme subsidente envahie par une sédimentation gréseuse qui débute au Berriasien et se termine à l'Albien (Guiraud, 1973 ; Vila, 1980).

2.4.3. Les phases tectoniques

L'évolution des Maghrébides au Mésozoïque et au Tertiaire s'intègre plus largement dans l'évolution géodynamique de la Méditerranée occidentale, caractérisée par l'affrontement des grandes plaques européenne et africaine.

a) Les événements tectoniques du Mésozoïque

A l'échelle des zones externes de l'Algérie nord orientale, les événements tectoniques durant cette époque sont peu étudiés. Les travaux réalisés jusqu' à présent s'accordent sur les événements suivants :

○ **Au Trias**

Le Trias correspond à une période d'extension généralisé qui affecte le domaine Atlasique. Les bassins triasique en Algérie ne sont connus que localement et en sub-surface. La présence des pélites et des évaporites très épaisses dans l'ensemble des domaines externes du Tell témoignent d'une forte subsidence à partir du Trias moyen et supérieur qui est facilitée sûrement par cette période de distension généralisée. Les séries évaporatiques (sédimentation argilo-gypseuse) sont accompagnées de coulées basaltiques et de carbonates du Keuper.

○ **Au Lias**

La distension provoque une subsidence différentielle. Celle-ci se poursuit jusqu'au Crétacé inférieur, permettant la création de bassins marins ouverts dans les hauts atlas sahariens (Wildi, 1983). La plate-forme constantinoise se distingue dès la fin du Lias comme un haut-fond à sédimentation calcaire dominante.

○ **Au jurassique moyen et supérieur**

A cette période, l'approfondissement et le caractère océanique des milieux sédimentaires se confirment et s'accroissent. Le bloc africain est décalé par un coulissage senestre par rapport à l'Ibérie et au bloc Alboran à partir de 165 Ma, engendrant probablement les premiers plissements dans les Babors vers la fin du Malm, avec des axes de plis d'orientation N-S. Le Malm représente la fin d'une période de distension et de subsidence caractérisant le Lias et le Dogger.

Dans les zones telliennes, les structures associées à la tectonique du Malm sont attestées par des discordances angulaires marquant la base du Crétacé inférieur. Plus au Sud, dans l'avant pays, la phase Jurassique supérieure se manifeste par une sédimentation terrigène au cours du Néocomien sans discordance angulaire notable (Wildi, 1983).

○ **Au Crétacé inférieur**

Aucune phase tectonique importante n'est connue à cette époque ni en Ibérie ni en Afrique. L'origine du dépôt des sédiments détritiques sur la bordure Nord de l'Afrique et sur le continent ibérique ne serait pas tectonique mais climatique.

D'après l'interprétation des anomalies magnétiques dans l'atlantique Nord, les coulissements senestres E-W entre l'Ibérie et l'Afrique s'arrêtent pratiquement dès l'Aptien supérieur (110 Ma) (Wildi, 1983).

Suivant une transversale régionale, au Crétacé inférieur on peut noter une alternance de régressions et de transgressions individualisant ainsi des zones sédimentaires préfigurant déjà les unités structurales majeures, tel le domaine néritique, qui dès cette période, apparaît comme un entablement massivement carbonaté situé entre deux zones vaseuses (Guellal et Vila, 1973).

○ **Au Crétacé supérieur**

Au Crétacé supérieur, il semble qu'un épisode tectonique important correspondant au Cénomaniens inférieur a eu lieu. En effet sur la bordure Sud-Ouest de la plate-forme néritique constantinoise et dans le Sud sétifien, la sédimentation devient planctonique. Les marnes pélagiques succèdent aux calcaires. Ce changement peut être relié à un épisode tectonique entraînant un relèvement du niveau eustatique. Cet épisode tectonique est le plus souvent traduit dans la sédimentation par une surface durcie (Hard-ground) observable dans plusieurs massifs (Oum Settas). Cette phase correspond à une phase compressive, qui coïncide avec le début de la rotation anti-horaire de l'Ibérie par rapport à l'Europe. Cette phase compressive a engendré des plis orientés E-W ainsi qu'une forte schistosité de fracture dans les Babors affectant les niveaux anté-*vraceniens*. Elle est orientée conformément aux plissements W-E à SW-NE. Des évaporites triasiques se trouvent remaniées et resédimentées dans des formations qui datent de l'Albien supérieur au Sénomien inférieur surtout (Wildi, 1983).

A cette époque la différenciation paléogéographique, apparue au Crétacé inférieur, se poursuit et s'accuse par le fonctionnement des zones positives et négatives. Dans le domaine néritique, la construction de l'entablement carbonaté s'achève avec l'émersion définitive de la fin du Crétacé supérieur. Cette émersion est confirmée par Guellal et Vila (1973).

- Remaniement conglomératique du *Vraconien-Turonien* dans le Sénomien dans la partie Nord du domaine néritique (massif de Chettaba).
- Présence de nombreux hard-grounds.
- *Turonien* localement érodé ou absent.
- Faciès néritique en lentilles (massif de Karkara)

b) Les événements tectoniques du Tertiaire

La chaîne alpine de l'Algérie Nord orientale s'est surtout structurée pendant les phases Tertiaires.

○ **A l'Eocène**

Cette phase compressive se situe vers la fin du Lutétien, appelée phase fini-lutétienne ou phase atlasique (Durand Delga, 1969 ; Raoult, 1974) ou encore phase priabonnienne selon Vila, (1980). Elle marque la fin d'un grand cycle sédimentaire ayant débuté dès le Trias supérieur, et dont l'organisation n'a pas été perturbée malgré des manifestations tectoniques locales enregistrées avant le Cénomani (Aris, 1994).

Cette phase est expliquée par la fermeture de la Téthys occidentale par la rotation de l'Afrique autour d'un pôle situé à l'Ouest de Tanger, conduisant à la collision entre la partie orientale de l'Alboran et la marge Africaine tellienne. Dans les zones internes, la position relative E-W de la Kabylie par rapport au Tell est bloquée dès l'Eocène supérieur. Elle est associée à un métamorphisme régional (Wildi, 1983).

Cette phase est associée à des accidents verticaux de direction NE-SW tels que l'accident N45°-50° E d'El Kentour qui se prolonge jusque dans l'avant pays au Sud-Ouest, entre les monts du Bélezma et ceux du Hodna correspondant à la « transversale de Constantine ».

○ **Au Miocène**

✓ **Phase compressive du Burdigalien**

La phase du Miocène inférieur est caractérisée par une direction de raccourcissement N-S. La partie occidentale de la plaque d'Alboran continue sa migration vers l'Ouest, pour entrer finalement en collision avec la marge rifaine de l'Afrique. Cette migration contribue à l'ouverture du bassin nord algérien. Cette phase se manifeste par :

- L'avancée de la nappe numidienne vers le Sud et la formation des olistostromes kabyles dans une dépression septentrionale.
- Un bombement à l'aplomb du bord kabyle méridional, où s'étaient antérieurement empilées les unités de flyschs sur les nappes telliennes au Priabonien.
- Des structures plissées, au sud du domaine kabyle.

A la fin du Miocène inférieur et au début du Miocène moyen, des bras de mer envahissent des golfes de la partie septentrionale des chaînes algériennes. Dans les Babors, les premiers sédiments post-nappes marins se déposent.

Cette transgression va de pair avec une phase volcanique calco-alkaline et un plutonisme qui a mis en place les intrusions granitiques en grande Kabylie, dans les Babors et en petite Kabylie. Les datations radio-métriques y indiquent souvent des âges entre 12 et 16 Ma.

✓ **Phase tangentielle tortonienne -phase alpine**

Pour Vila (1980), c'est la phase tortonienne majeure, à vergence Sud qui est responsable de vastes raccourcissements impliquant les formations postérieures au Burdigalien supérieur dont la nappe numidienne. Toujours selon le même auteur, cette phase serait responsable de la genèse de la nappe néritique constantinoise, des unités allochtones des Sellaoua, de l'ensemble «sud-Sétifien» et des «unités méridionales à nummulites».

Cette phase a engendré dans l'ensemble de Algérie Nord orientale des chevauchements vers le Sud des unités méridionales à Nummulites, des unités sud-sétifiennes et des écailles de Sellaoua, ainsi que des plissements à axes E-W des monts du Hodna jusqu'à la transversale de l'Aurès ; genèse des « plis emboutis » qui interfèrent et reprennent les plis éocènes.

Pour revenir à la notion de tectonique tangentielle tortonienne selon Vila (1980), du nord au sud et de haut en bas de l'édifice structural on distingue :

- La zone intermédiaire est fortement plissée (Burdigalien-Langhien).
- La zone nappée méridionale, où se manifestent de vastes mouvements anormaux, impliquant les formations postérieures au Burdigalien supérieur.
- Les nappes telliennes sont reprises en bloc.
- L'ensemble allochtone sud-Sétifien constitue un empilement de lames en série normale.
- La nappe néritique constantinoise et les unités allochtones de type Sellaoua relaient en plan l'ensemble allochtone sud-Sétifien vers l'Est.

c) La Tectonique récente

Cette phase tectonique post-nappes est responsable de l'orographie actuelle. Elle a induit le comblement des bassins mio-pliocènes, alimentés par la destruction des reliefs environnants.

A l'échelle du Constantinois, les structures attribuées à cette tectonique évoquent une tectonique polyphasée. En effet, deux phases successives de distension et de compression ont affecté les formations tortoniennes, entraînant ainsi un resserrement des structures préexistantes, et la formation de plis qui s'alignent en gros sur la direction atlasique. Parmi ces plis on note ceux de Djebel El Ouahch, du massif du Chettaba et du Djebel Djaffa.

Par ailleurs, des failles inverses parfois décrochantes ou chevauchantes ainsi que des déformations cassantes de direction E-W et NW-SE, tel l'accident de M'cid Aïcha-Debbar d'une centaine de kilomètres, peuvent être observées. Le long de cet accident, des chevauchements Nord-Sud post-miocène sont localement signalés (Guellal et Vila, 1973).

2.4.4. Géologie locale

La région de Constantine avec sa morphologie exceptionnellement accidentée caractérisée par des massifs qui appartiennent au domaine externe de la chaîne des Maghrébides.

Les principaux traits stratigraphiques de la région correspondent en fait à des formations calcaires Jurassico-Crétacées avec une couverture marno-calcaire d'âge Sénonien supérieur à Eocène et une série argilo-gréseuses d'âge allant de l'Oligocène au Burdigalien appartenant à la nappe numidienne.

○ Trias

Le Trias est essentiellement évaporitique et se présente en époinements diapiriques et en lames éjectées le long des accidents. Il s'agit de masses de gypses et d'argiles de couleur rouge lie-de-vin très caractéristique qui contiennent le plus souvent des blocs calcaro-dolomitiques, des cargneules, des marnes bariolées verdâtres, des minéraux libres tels que le quartz bipyramidé et des dolomites en rhomboèdres sont associés à ces évaporites. (Benabbas, 2006).

Parmi les affleurements connus dans le Constantinois, on peut citer du Nord au Sud :

- Les affleurements des massifs du Kheneg et Djebel Akhal, au Nord-Ouest et à l'Ouest de Constantine.

- Ceux de la dépression du Chettaba, Djebel Ech Chebka et Aïn El Kebch à l'Ouest et au Sud-Ouest de Constantine.
- Ceux liés aux formations tertiaires situées au Sud des massifs du Felten et de l'Oum Settas.

- **La nappe néritique constantinoise**

Plate-forme marine caractérisée par des formations principalement carbonatées du jurassique supérieur au sénonien transgressif.

- ✓ ***Jurassique supérieur***

Le Jurassique supérieur est essentiellement carbonaté. Il comprend des dolomies noires, largement cristallines, surmontées par une barre de 90 à 100 m de calcaires massifs (Benabbas, 2006).

- ✓ ***Néocomien***

Il est carbonaté et débute par une série qui montre une alternance entre les calcaires fins et des marnes rosées ou jaunâtres. Il se prolonge par 150 m de calcaires à silex, sauf au Djebel Gueriou et Fortass. Plus à l'Ouest dans les monts d'Aïn M'lila, le Néocomien est uniquement carbonaté et comporte des alternances calcaro-dolomitiques sur 300 m environ. (Aris, 1994)

- ✓ ***Barrémien***

Le Barrémien est calcaro-dolomitique, représenté par une épaisse série (250 à 300m) de calcaires massifs, clairs dans lesquelles s'intercalent de rares passées de marnes grises. Les calcaires contiennent une riche microfaune dont les Lituolidés, les Textularidés, *Choffatella decipiens*, *Orbitolinopsis capuensis*, *Salpingoporella muchlbergi* (Aris, 1994 ; Benabbas, 2006).

- ✓ ***Aptien***

Il est généralement représenté par des calcaires homogènes comprenant une série épaisse de calcaires gris en bancs réguliers très riche en Miliolidés et débris de rudistes.

Au sommet de cette série, on rencontre une association à *Ovalveolina*, *Orbitolina sub concava* (Vila, 1980).

✓ ***L'Albien et le Vraconien***

Ils sont constitués de bancs calcaires noirs (Benabbas, 2006). Dans le massif de Djebel Frikitia au Sud-Ouest de Chettaba, l'Albien est représenté par une série constituée de marnes et de calcaires noduleux à Ammonites, Mélobisiées et des hedbergelles de types washitensis, avec une association à foraminifères benthiques et à Ostracodes (Vila, 1980).

✓ ***Cénomanién***

Il est représenté dans les massifs du Kheneg, du Grouz, du Felten, du Rocher de Constantine, Djebel Kellal et de l'Oum Settas par une épaisse série de calcaires blancs massifs associés à des barres biodétritiques à rudistes, des niveaux de biomicrites à Miliolidés et localement des calcaires rubanés (Van de Fliert et al., 1957). Le Cénomanién manque dans la plupart des massifs méridionaux de la nappe néritique Constantinoise, et il est pélagique dans la série très septentrionale du Kef Hahouner (Vila, 1980).

✓ ***Turonien***

Le Turonien montre une lithologie comparable à celle du Cénomanién. Il comprend des calcaires rubanés, incluant de grosses barres de calcaires massifs clairs à rudistes (Radiolarites, Hippurite) et à minces intercalations des calcaires sombres. Il affleure dans le rocher de Constantine et dans les massifs de Felten et du l'Oum Settas (Vila, 1980).

✓ ***Sénonien inférieur***

Le sénonien inférieur est essentiellement marno-calcaires. Au niveau du synclinal du Texas, il montre une épaisse série marno-calcaire et des marnes à *Globotruncana* dans laquelle sont localement signalés des niveaux à Ammonites et à Huitres (Voute, 1967). Le Sénonien inférieur, situé au sud de Constantine, appartient à une unité allochtone méridionale (Vila, 1980).

✓ ***Sénonien supérieur***

Il est représenté par les mêmes formations que celle du Sénonien inférieur. Il peut reposer en discordance sur plusieurs termes inférieurs d'âge différents (Aptien à Turonien). Il affleure au Nord et au Nord-Ouest du massif de l'Oum Settas, dans le rocher de Constantine et plus au Nord-Est dans les massifs de Guelma.

○ **Les nappes telliennes**

✓ *La nappe ultra-tellienne*

L'unité ultra-tellienne est largement développée dans le Constantinois. Elle est représentée par des formations marneuses et marno-calcaires de faciès généralement clairs d'âge Barrémien à Eocène.

✓ *Les nappes telliennes sensu-stricto*

Localisées dans le triangle Chelghoum El Aïd-Constantine-Sigus à matériels allant du Sénonien inférieur à l'Eocène, ces nappes sont semblables à la série de type Djemila (Vila, 1980).

Elles sont caractérisées par:

- Des marnes grises ou beiges avec de minces intercalations marno-calcaires (250 à 300m d'épaisseur) d'âge Sénonien inférieur.
- Des marno-calcaires d'âge Sénonien supérieur, dont la couche peut atteindre localement 250 à 300 m.
- Un ensemble monotone de marnes ou d'argiles carbonatées noires du Maastrichtien au Paléocène.
- Des calcaires massifs blancs à patine bitumineuse d'âge Yprésien-Lutétien inférieur représenté par une série d'environ 200m.
- Des marnes grises ou noires à boules jaunes Lutétien à Priabonien.

✓ *La nappe péni-tellienne et unités méridionales à nummulites*

C'est une alternance de carbonate et de vase allant du Lias au Paléocène :

- Lias: calcaires massifs.
- Dogger : calcaires oolithiques, oosparites dont la couche peut atteindre 300m.
- Malm: dolomies noires sableuses, calcaires à silex et micrites en petits bancs.

- Crétacé inférieur: pelitico-marneux, micritique et à rares niveaux gréseux.
- Albo-cénomaniens : représenté dans les gorges de Hammam Grouz par une barre calcaire de près de 200 m d'épaisseur.
- Crétacé moyen : calcaire, silex noirs en petits bancs.
- Sénonien inférieur : conglomérats avec passages marneux.
- Sénonien supérieur: il débute par une barre conglomératique (50 à 100 m), devient marneux au Campanien supérieur et se termine par une barre de calcaire-marneux claire au sommet.
- Maastrichtien au Paléocène: marnes grises ou noires que l'on rencontre uniquement sur le versant Sud-Est du Djebel Chettabah.

- **La nappe numidienne ou flysch numidien**

Le flysch Numidien est représenté par une série argilo-gréseuse d'âge Oligocène à Burdigalien basal.

La série Numidienne typique est caractérisée, de la base au sommet, par une succession de trois types de faciès: des argiles à Tubotomaculum, des grès épais alternant avec des niveaux argileux et des marnes à silexites vers le sommet.

- Les argiles de base à Tubotomaculum dites sub-numidiennes, contiennent des passées gréseuses renfermant localement des niveaux à blocs variés d'âge Eocène.
- Les grès numidiens, présentent une épaisse série. Au Djebel Grouma, près d'Oued Zénati à l'Est de Constantine.

On note dans cette série gréseuse trois ensembles :

- Un premier ensemble gréseux, formé de grosses barres, et débutant par des alternances de grès et d'argiles (100 m environ) à Globigérinidès du Stampien supérieur.
- Un deuxième ensemble représenté par des argiles à bancs de grès intercalés d'âge Aquitanien inférieur à Burdigalien, vers le sommet.
- Le troisième est gréseux et moins épais (200 m). Il est rattaché à un âge au moins Burdigalien supérieur par rapport aux derniers termes de l'ensemble argileux sous-jacent.

○ **Les séries post-nappes**

✓ ***Mio-Pliocène continental***

Des conglomérats rougeâtres marquent la base du Miocène inférieur et constituent une zone limitée le plus souvent par des failles. Le Miocène moyen, Laguno-lacustre, afflue surtout dans la dépression séparant Constantine de la chaîne Numidique et comprend deux termes: un terme inférieur formé de marnes grises à gypse et Gastéropodes, un terme supérieur comprenant des marnes légèrement beiges où apparaissent des chenaux. Alors que le Miocène supérieur continental est sous forme de dépôts détritiques rougeâtres au Pliocène. La sédimentation est composée d'argiles rougeâtres quelquefois sableuses et de calcaires lacustres.

L'ensemble inférieur de la série du bassin de Constantine est assimilé au Miocène.

✓ ***Quaternaire***

Des éboulis, des alluvions et des formations de pente constituent le Quaternaire (Beanabbas, 2006).

- Les éboulis se sont surtout développés en bordure des reliefs numidiens et des massifs calcaires comme le Djebel Oum Settas.
- Les alluvions récentes des oueds correspondent à des limons, des graviers et des galets roulés.
- Les alluvions anciennes des oueds se composent de cailloux roulés, limons et graviers parfois, encroûtés, provenant d'anciennes terrasses. Les alluvions anciennes des plateaux sont composées de cailloux roulés, limons et graviers. Elles sont souvent cimentées par une croûte calcaire.
- Les formations de pente correspondent à des glacis polygéniques qui forment des surfaces très faiblement inclinées, près des plaines recouvertes d'un matériel élastique, avec de vastes placages sur les versants marneux. Les glacis anciens de Constantine, dans la région d'El Aria, sont constitués exclusivement de blocs du Numidien bien roulés.
- Les croûtes calcaires du Villafranchien sont directement installées sur des calcaires et des conglomérats fossilifères dans lesquelles il est difficile de situer la limite entre le Pliocène supérieur et le début du Villafranchien.

- Tufs calcaires ou Travertins du Mansourah. Ils correspondent soit à des zones de sources chaudes, soit à des formes de concrétions plus ou moins vacuolaires gris à jaunâtre.

- **Log stratigraphique synthétique**

La région d'étude présente une grande variété de terrains sédimentaires allant du Crétacé au Quaternaire. Leur structure géométrique est difficile à maîtriser à cause, d'une part, d'une tectonique néogène complexe et d'autre part, des fréquentes variations latérales de faciès dans les formations miocènes (Bougdal, 2007). Le log stratigraphique (Fig.20) permet d'illustrer les grands ensembles lithologiques appartenant à cette région.

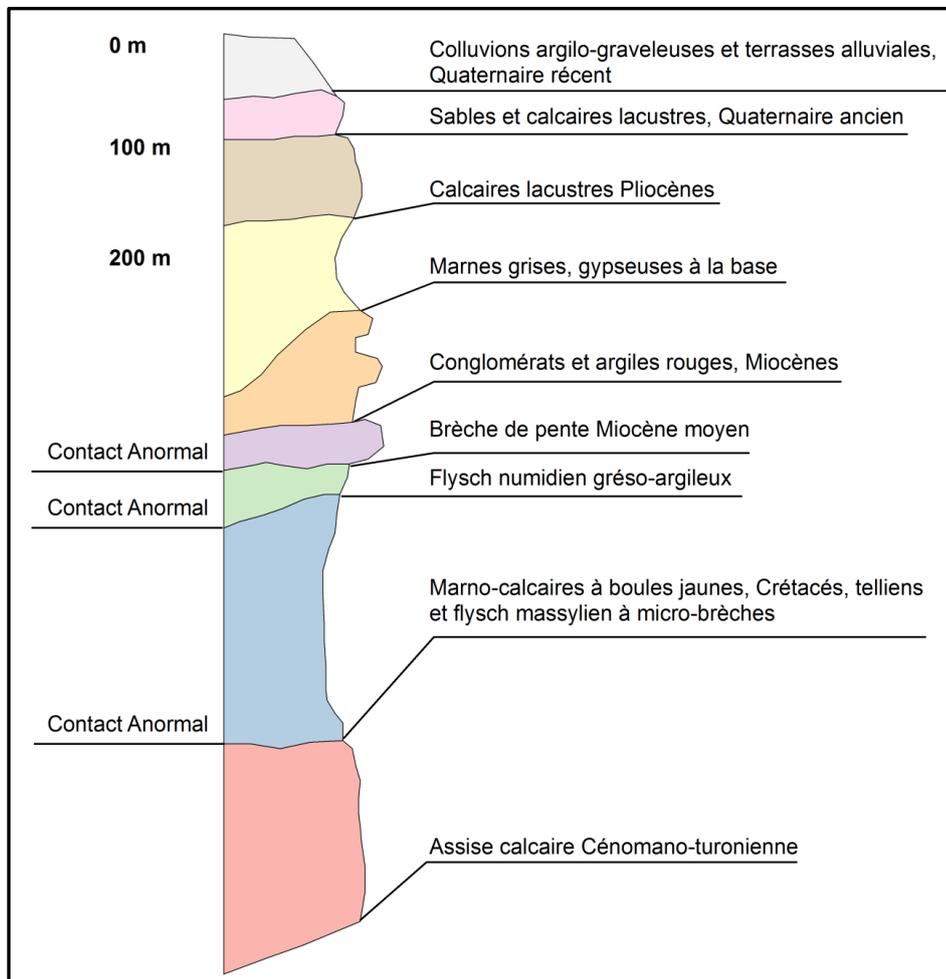


Figure 20. Colonne stratigraphique de la région d'étude (Synthèse)

2.5. Réseau hydrographique

La région de Constantine est caractérisée par un réseau hydrographique dense, constitué essentiellement d'affluents réunis dans un cours d'eau convergeant vers un collecteur principal appelé Oued Rhumel. Ce dernier traverse le long de son parcours les plaines de Tadjanet, Oued-Athmania en amont et celle d'Ain-Smara en aval. En s'approchant de Constantine, il reçoit sur sa rive droite l'Oued Bou Merzoug. Parmi les affluents des deux Oueds, on trouve Oued El Athmania, Seguin, Ziad et Oued Smendou qui convergent vers Oued Rhumel, et Oued El Klab, Melah, Berda et Oued Hamimine qui affluent Oued Bou Merzoug. (Fig.21)

Il est à noter qu'en période pluvieuse, la violence des pluies fait souvent que le débit des Oueds atteint des pointes record, pour retomber quelques jours plus tard à un niveau assez bas. Par contre, leurs débits diminuent en période sèche.

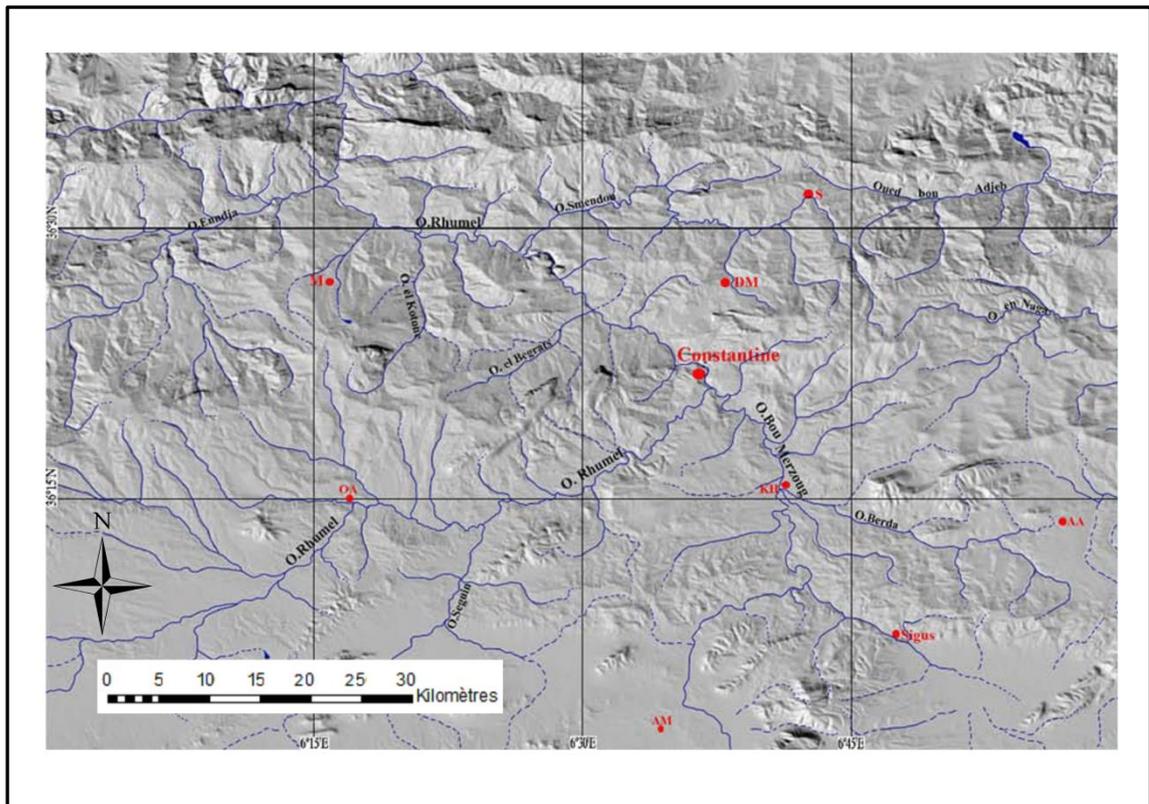


Figure 21. Réseau hydrographique de la région d'étude (modifiée, d'après : Bouedja, 2010)

2.6. Sismicité

Les différentes publications parues concernant la sismicité de la région de Constantine, (Rothé et al., 1950 ; Hée, 1950 ; Roussel, 1973 ; Benhallou 1985), montrent que les séismes qui ont affecté cette région sont modérés. La carte de zonage sismique du territoire algérien élaboré par le CRAAG, indique que cette région est située au niveau 2 ; elle est caractérisée par une sismicité active, mais de grandeur modérée (Fig.22).

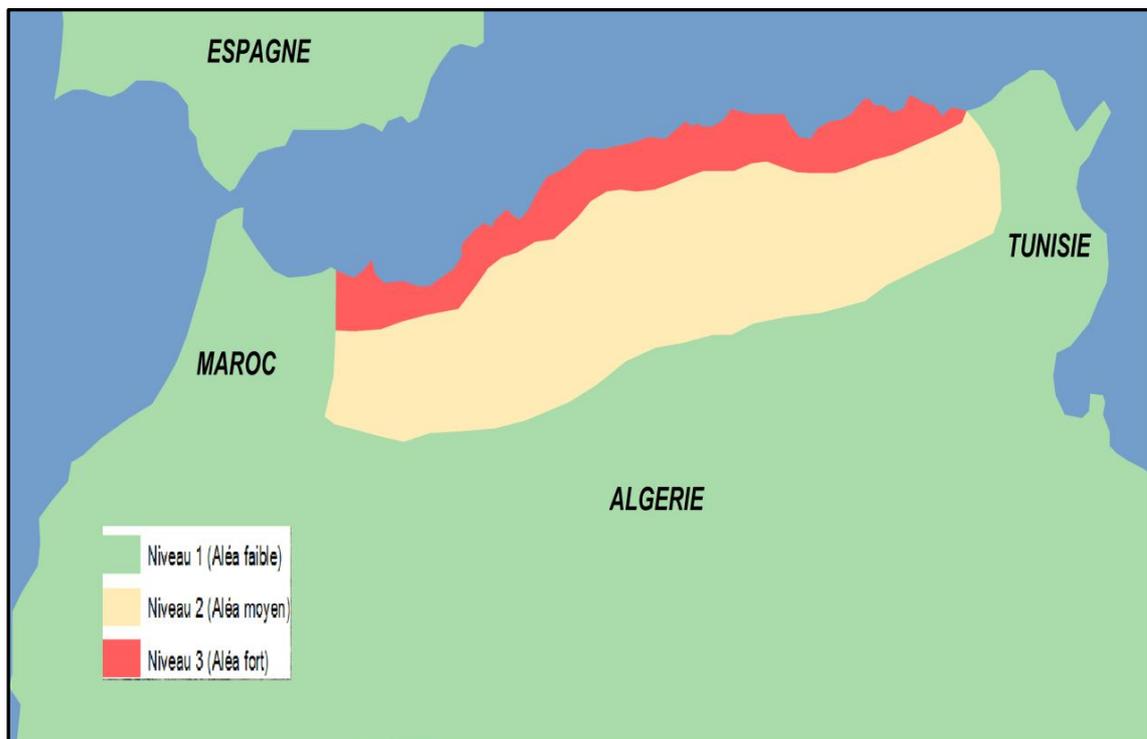


Figure 22. Zonage sismique du territoire Algérien (modifiée, d'après : CRAAG, 2000)

Les principaux événements sismiques, qui se sont produits aux environs immédiats de la ville de Constantine sont les suivants :

- Le séisme du 04/08/1908 au nord de Constantine avec une magnitude 5, 25.
- Le séisme du 06 /08/1947 à Oued Hamimine avec une magnitude de 5,3.
- Le séisme du 27/10/1985 à El Aria avec une magnitude de 5,7.

Ce dernier affecte la région nord des hauts plateaux, plus précisément la région dite « des nappes néritiques constantinoises ». Il témoigne d'un coulissage pur le long d'une faille de direction N 45° et dont l'épicentre était situé dans la région d'El Aria. Il est considéré comme le séisme le plus important dans l'Est algérien.

3. Le site d'étude principal

En vue de la cartographie à échelle détaillée de la susceptibilité aux glissements de terrain, la sélection d'un secteur d'étude d'une superficie réduite s'est rapidement imposée. Pour cela, le secteur d'étude situé à environ 7 km au nord-est du chef-lieu de la ville de Constantine constitue le site principal où sont conduites les investigations.

La zone étudiée, d'une superficie de 5.83 km², se trouve entre les villes de Constantine et Didouche Mourad (Figs.23 et 24). Elle est comprise entre les latitudes 4026087 m et 4035781 m Nord et entre les longitudes 289356 et 292706 m Est. Caractérisée par un climat méditerranéen de type semi-aride frais, l'aire d'étude s'étend sur une zone de moyenne montagne dont l'altitude varie de 659 à 1000 mètres au-dessus du niveau de la mer. Dans ce secteur, les pentes des versants sont assez prononcées.



Figure 23. Orthophoto montrant la localisation du site d'étude

Ce site a été traversé par une section de l'autoroute Est / Ouest avec une longueur de 13 km. Sur cette section, l'autoroute passe en tunnels en deux endroits : Le premier tunnel se situe au milieu du site d'étude, où il traverse du Sud au Nord la zone montagneuse boisée du Djebel El Ouahch sur une longueur totale de 1891 m. Le tunnel 2 franchit perpendiculairement l'arête rocheuse du Djebel Kellal suivant une direction Nord-Sud sur une longueur de 295 m (Fig.24).

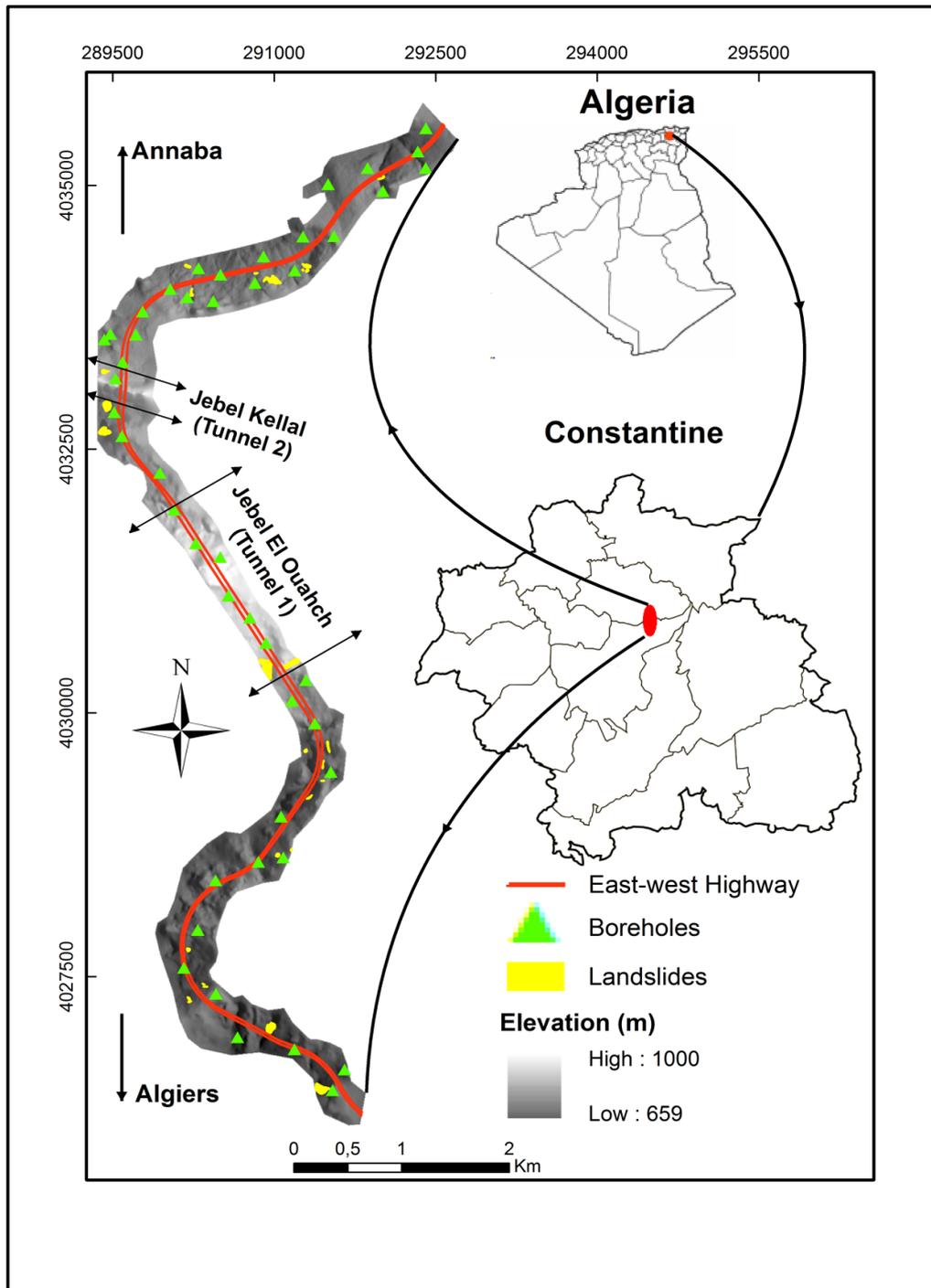


Figure 24. Localisation du site d'étude (d'après : Achour et al., 2017)

La carte géologique d'El Aria au 1/50 000 (Fig.25) et les observations sur le terrain montrent que la zone d'étude se situe sur une zone géologique complexe. Les grands ensembles lithologiques sont représentés par des nappes de charriage où dominent les unités marneuses et marno-calcaires à la base, d'âge Crétacé. Ces unités sont recouvertes, dans la région du Jebel El Ouahch, par la nappe Numidienne (Oligocène - Miocène inférieur) formée par des grès grossiers, massifs, au sommet et des argiles à la base. Des colluvions épaisses, de plusieurs dizaines de mètres, grossières, à blocs gréseux et à matrice sableuse, d'âge Quaternaire, recouvrent largement les formations allochtones.

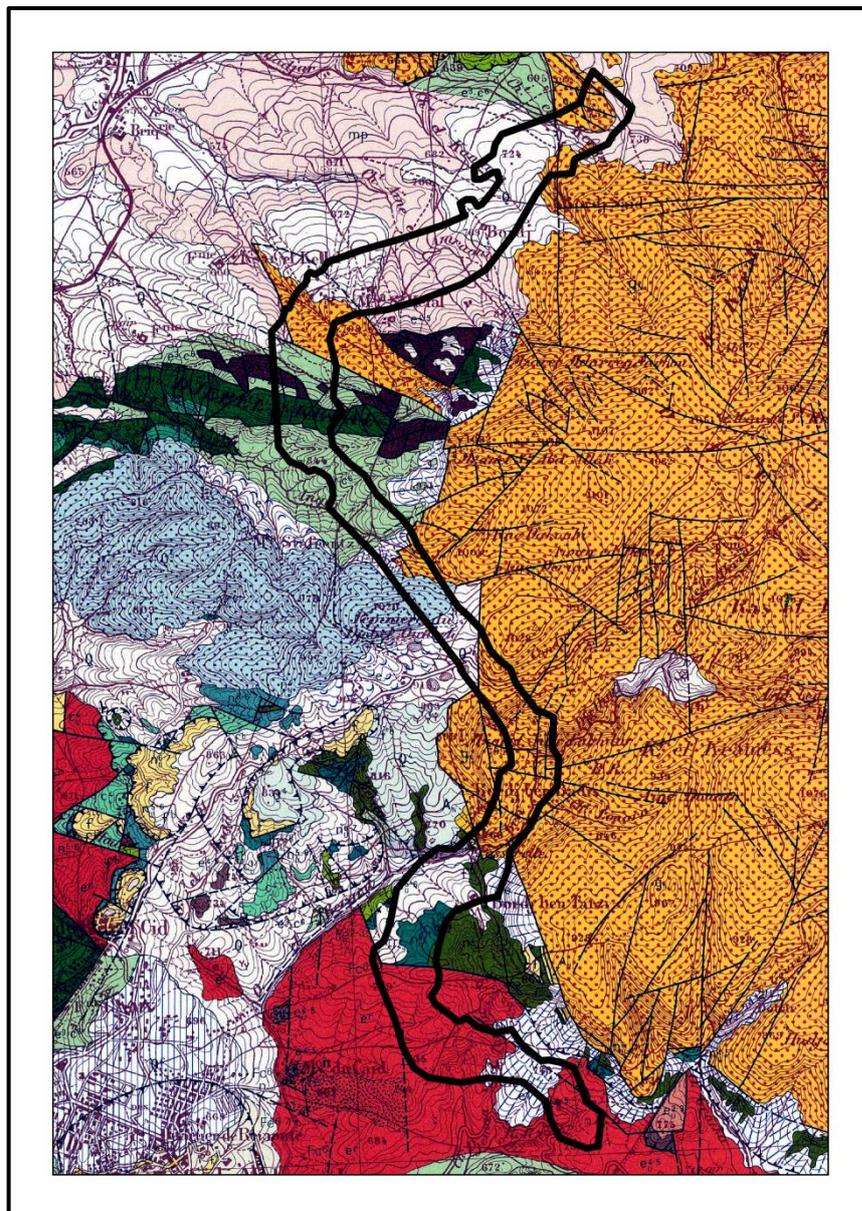


Figure 25. Extrait de la carte géologique d'El Aria au 1/50 000.

4. Conclusion

L'analyse hydro-climatologique de la région d'étude nous a permis de constater qu'il y a une très grande variation des précipitations et des températures. Aussi, elle nous a permis de définir que les critères météorologiques sont l'un des principaux facteurs de déclenchement des glissements de terrain. La plupart des glissements dans notre secteur d'étude surviennent après une période de sécheresse plus ou moins prolongée ; ainsi des précipitations, mêmes moyennes, peuvent déclencher cette instabilité de terrains.

La géologie d'une région influe fortement sur la stabilité des pentes. Elle est considérée comme un facteur causatif fondamental dans cette étude. Il existe une relation étroite entre ce facteur et l'occurrence de glissements de terrain. À partir des premières constatations concernant la géologie de Constantine, il ressort que l'aspect structural de la région est fort complexe. La tectonique néogène post-nappes et quaternaire se distingue par des plis d'échelle kilométrique à grand rayon de couverture et des failles à rejet vertical important. À l'échelle du site, Les grands ensembles lithologiques sont représentés par des nappes de charriage où dominent les unités marneuses et marno-calcaires à la base, d'âge Crétacé. Ces unités sont recouvertes, dans la région du Djebel El Ouahch, par la nappe Numidienne (Oligocène - Miocène inférieur) formée par des grès grossiers, massifs, au sommet et des argiles à la base. Des colluvions épaisses, de plusieurs dizaines de mètres, grossières, à blocs gréseux et à matrice sableuse, d'âge Quaternaire, recouvrent largement les formations allochtones.

Le caractère morphologique très accidenté du secteur d'étude est l'un des facteurs essentiels d'apparition des glissements de terrain. La carte hypsométrique vient pour mettre en évidence un ensemble de morpho-structures qui a une relation avec les différentes phases tectoniques qu'a connues la région. L'activité sismique modérée de la région d'étude peut également accentuer la vulnérabilité des constructions exposées à l'aléa « glissement de terrain ».

Le choix des variables à prendre en considération dans une évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain dans le secteur étudié est très important pour obtenir de bons et objectifs résultats. Les différentes variables retenues pour cette étude sont présentées dans le chapitre 3.

Chapitre 3

Préparation des données

1. Introduction

Les données nécessaires à la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la zone d'étude ont été choisies en fonction de trois critères essentiels : La pertinence, la disponibilité et l'échelle. La pertinence se réfère aux principaux facteurs à l'origine de glissements de terrain dans la zone d'étude. La disponibilité fait référence à des facteurs pertinents qui sont facilement disponibles pour être utilisés pour l'élaboration d'une carte de susceptibilité au glissement de terrain. L'attribut d'échelle est un facteur important, et se réfère à des échelles de carte de différents facteurs de causalité des glissements de terrain qui seront utilisées pour créer une carte de la stabilité des pentes. (Maquaire, 2002)

Huit facteurs de prédisposition sont sélectionnés comme entrées pour les modèles de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans cette étude. Ces facteurs sont : la pente, l'exposition des versants, la lithologie, la proximité aux failles, la proximité au réseau hydrographique, l'occupation du sol, la cohésion et l'angle de frottement interne.

2. Préparation de la carte d'inventaire des glissements de terrain

La première et la plus simple approche pour toute étude de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain est la réalisation d'un inventaire de ces glissements. Ces inventaires sont considérés comme la base de la plupart des techniques de cartographie de la susceptibilité (Dai et al., 2002). De plus, une carte d'inventaire des glissements de terrain est également l'information de base pour l'évaluation et la réduction des risques de glissements de terrain (Wieczorek, 1984). Sa construction nécessite beaucoup de temps et d'effort. Dans cette étude, moins d'efforts ont été consacrés à l'analyse des causes de déclenchement des glissements. Par conséquent, les informations sur les causes possibles ou de l'histoire des glissements de terrain ne sont pas disponibles.

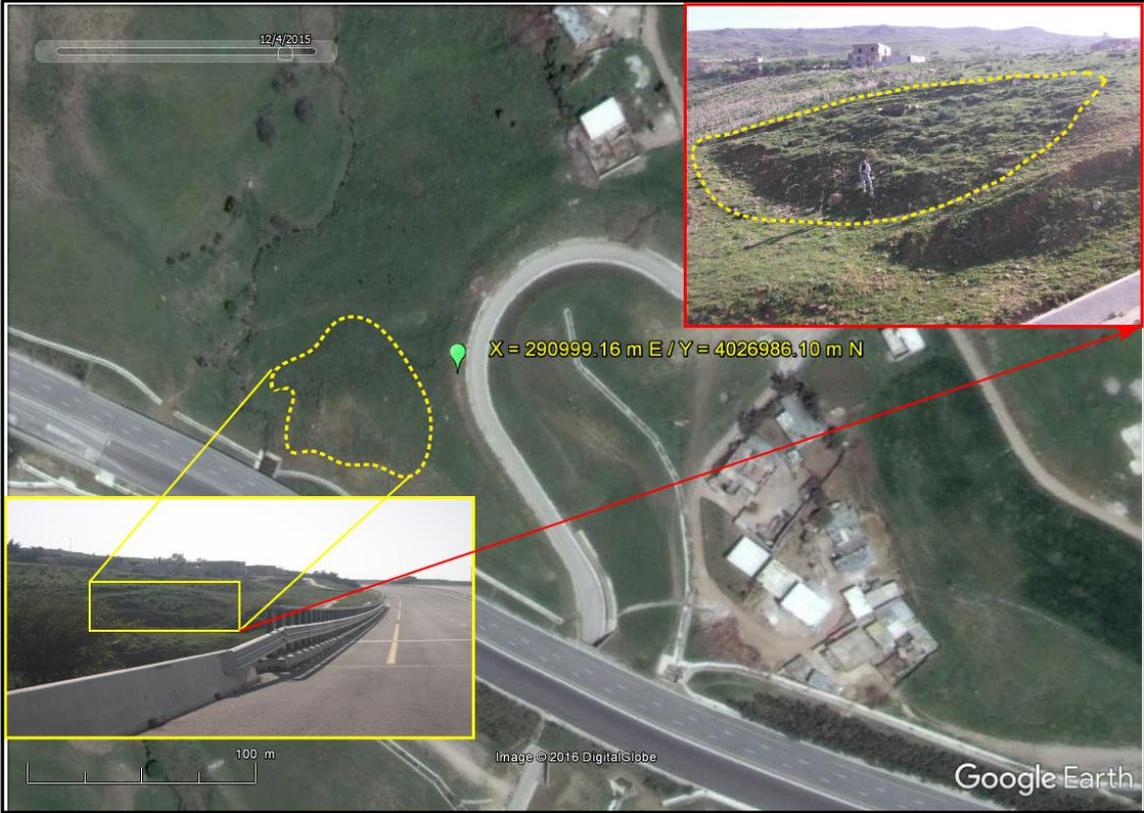
Trois méthodes de cartographie de l'inventaire des glissements de terrain ont été utilisées:

- Collecte des données d'archives (Agence nationale des autoroutes, ANA) ;
- L'interprétation de l'occurrence des glissements de terrain à partir d'images satellitaires ;
- Travail sur terrain en utilisant le GPS.

Dans cette étude, l'inventaire a été réalisé à partir d'orthophotos digitales de Constantine, ainsi que de courbes de niveau. La superposition des courbes de niveau aux orthophotos a permis le repérage des glissements de terrain. Puis, un travail sur le terrain a été fait pour valider ces données en retirant les points qui ne sont pas des glissements de terrain, et en ajoutant ceux qui ont été oubliés ou qui n'étaient pas visibles depuis les orthophotos. Les différentes images Landsat 7 sont analysées de nouveau afin de préciser les limites des phénomènes inventoriés sur le terrain (sous forme de polygones). Les données d'archives de l'Agence Nationale des Autoroutes (ANA) ont été utilisées comme support de comparaison avec les points recensés dans cette étude.

Les photographies suivantes proposent des exemples de quelques images satellitaires montrant des glissements de terrain déjà localisés sur le terrain. (Fig.26)







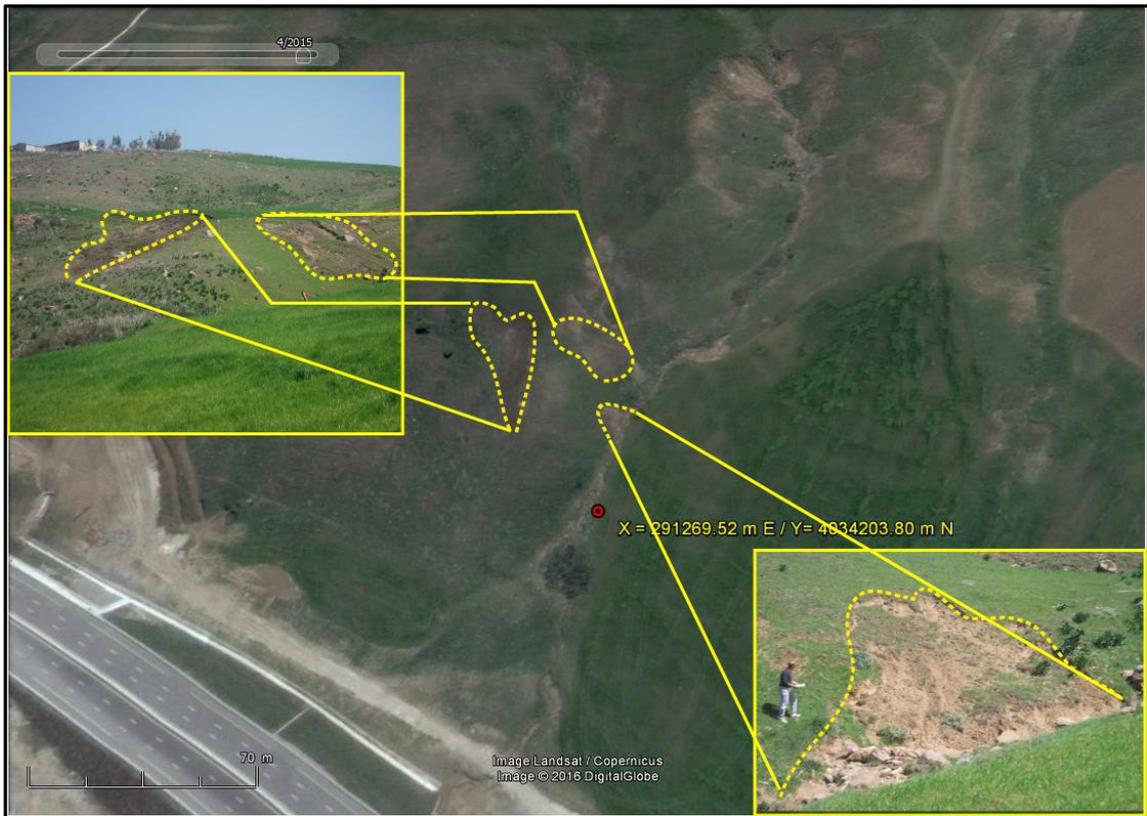


Figure 26. Photographies montrant quelques événements référencés dans Landsat 7

De nombreux endroits de glissements de terrain ont été identifiés dans le secteur d'étude (Fig.27). Les glissements de terrain sont un phénomène courant dans ce site, surtout pendant la saison des pluies. Ils se produisent fréquemment lorsque les précipitations sont concentrées dans un court laps de temps. D'autre part, les pluies qui durent pendant de longues périodes (jours ou semaines) en Novembre, Décembre et Janvier peuvent également provoquer des glissements de terrain.

29 glissements, de type rotationnel, ont été identifiés et cartographiés. Le plus petit glissement de terrain qui a été identifié dans le site a une superficie de 77 m^2 , tandis que le plus grand a 12515 m^2 . Ces glissements de terrain couvrent environ $0,058 \text{ km}^2$ de la surface totale du site ($5,83 \text{ km}^2$), ce qui représente environ 1%. Quelques photos de glissements de terrain observées dans le site sont présentées dans la figure 28.

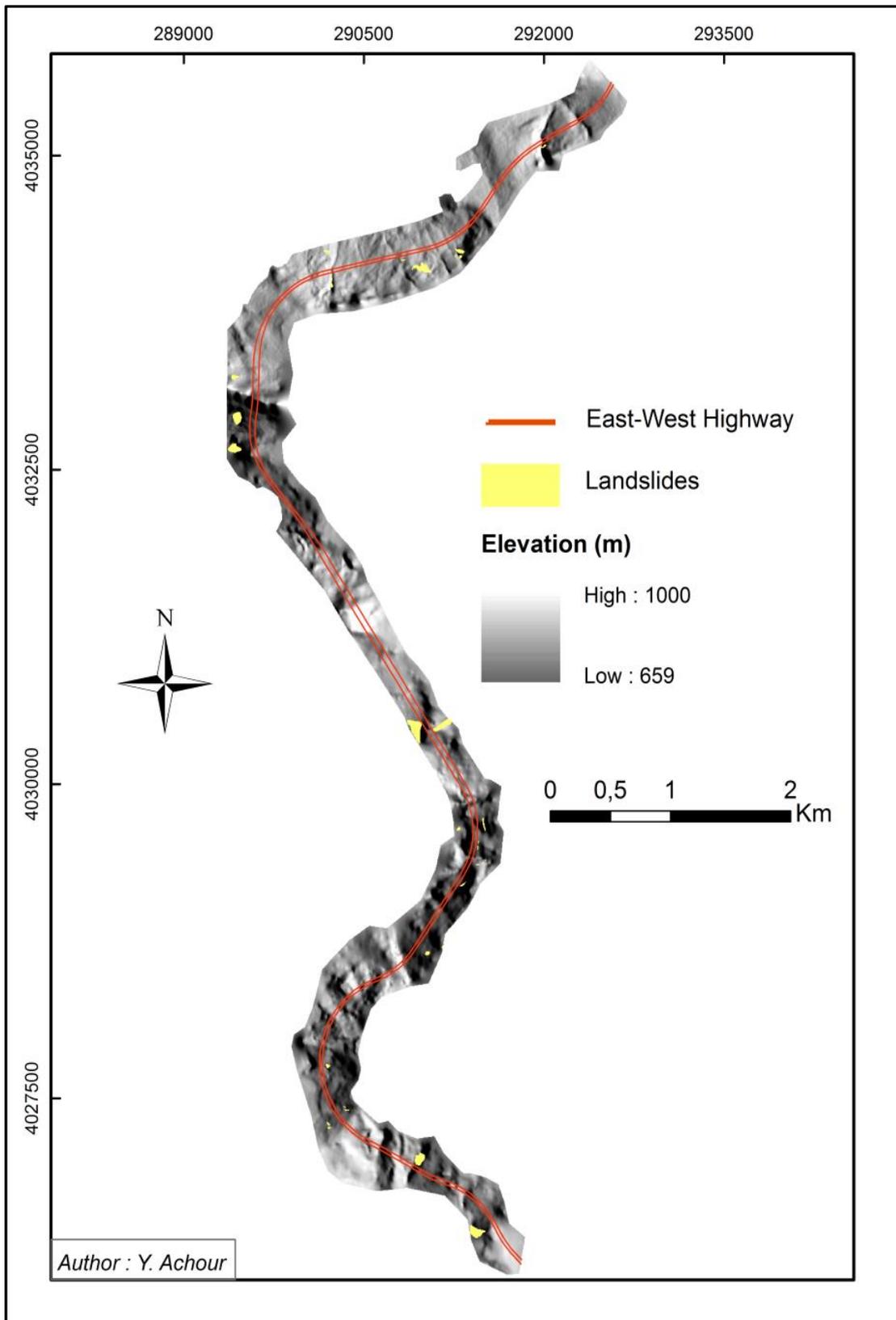
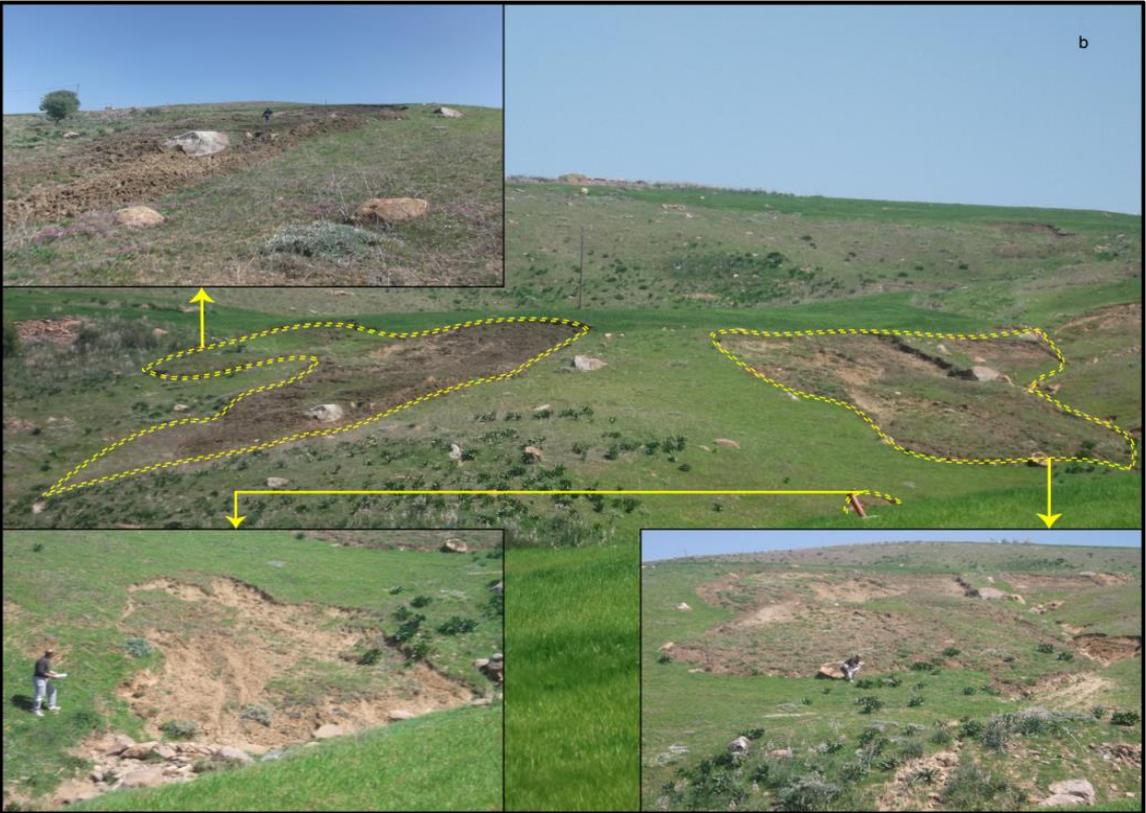


Figure 27. Localisation des glissements de terrains (d'après : Achour et al., 2017)





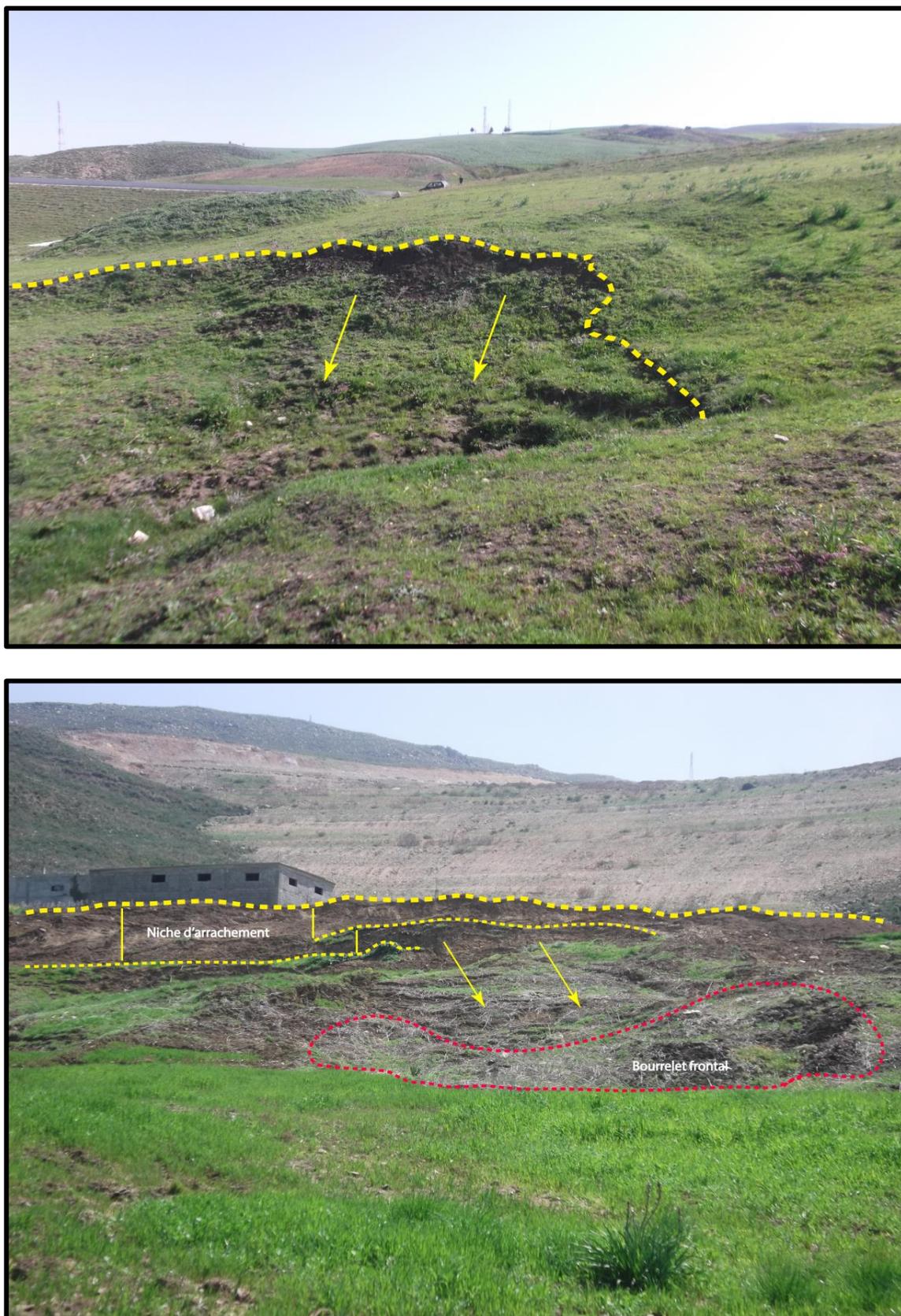


Figure 28. Photos montrant quelques glissements de terrain au voisinage du tracé de l'autoroute Est/Ouest de la section étudiée

La figure 29 propose une comparaison du nombre de glissements identifiés dans chacun des trois inventaires disponibles pour la zone d'étude. Il est ainsi possible d'identifier des différences dans le nombre de phénomènes inventoriés. Nous avons recensé 17 glissements à partir des données d'archives, l'inventaire par photo-interprétation en recense 10 alors que l'inventaire terrain permet d'en identifier 29 glissements.

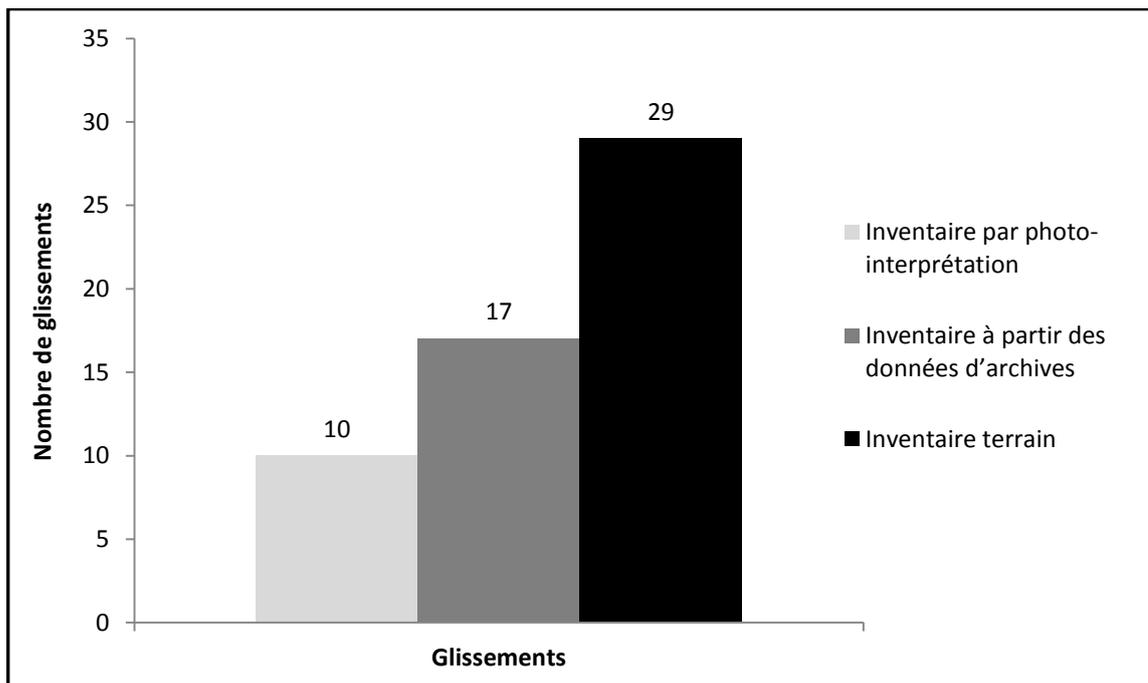


Figure 29. Histogramme comparatif du nombre de glissements identifiés par photo-interprétation, données d'archives et sur le terrain

Dans le cas des inventaires sur le terrain, plusieurs glissements n'ont pas été retrouvés lors du traitement des photos satellitaires (Fig.30), ceci s'explique du fait que ces photos ont une qualité (résolution) insuffisante pour le cas de cette étude (échelle large). De même, 12 glissements cartographiés sur le terrain ne sont pas retrouvés dans la base de données de l'ANA. Ceci s'explique par le fait que la période d'exécution de notre inventaire vient 8 ans après l'inventaire exécuté par l'ANA.



Figure 30. Photographies montrant quelques événements recensés sur le terrain qui sont invisibles dans Landsat 7

3. Variables prédictives

Au même titre que l'inventaire, les données spatialisées représentant les facteurs de prédisposition des glissements de terrain (variables prédictives), sont indispensables pour la cartographie de la susceptibilité. L'acquisition de ces données peut se révéler être une étape longue et coûteuse, surtout lorsque le terrain d'étude est vaste et que l'échelle de collecte des données est grande.

La sélection de ces variables avec une contribution significative pour créer un modèle est un défi. Il n'y a pas de règles universelles concernant la sélection des facteurs de prédisposition pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain. Les facteurs retenus pour l'évaluation de la susceptibilité dans une étude doivent être opérationnels, complets, non uniformes, fondamentaux, et mesurables (Ayalew et Yamagishi, 2005). Sur la base de ces critères ; la pente, l'exposition des versants, la lithologie, la proximité aux failles, la proximité au réseau hydrographique, l'occupation du sol et les paramètres géotechniques (cohésion et angle de frottement interne), un total de 8 facteurs de prédisposition a été pris en compte dans cette étude. Dans la suite de ce chapitre, nous présentons une à une ces 08 variables qui seront utilisées par la suite dans la construction des modèles finals.

3.1. Paramètres topographiques

Les paramètres topographiques de terrain sont essentiels dans le cadre d'analyses qualitatives et quantitatives de la susceptibilité aux glissements de terrain par SIG. Ces paramètres sont généralement représentés par les Modèles Numériques de Terrain (MNT), à partir desquels différents paramètres morphologiques sont extraits (pente, exposition, courbure, indice de position topographique, etc.).

La qualité d'un MNT est liée (Chang et Tsai, 1991 ; Carrara et al., 1997 ; Florinsky, 1998 ; Hengl et al., 2003) :

- A la technique d'acquisition de la base de données spatiale (densité des données et précision) ;
- A la technique de construction du MNT (algorithme d'interpolation) ;

- A la complexité du terrain à modéliser.

Pour cette étude, l'achat d'un MNT précis n'a pas été envisagé en raison d'un manque de financement destiné à ce projet de recherche. Deux MNT ont été générés pour cette étude en passant par les deux étapes suivantes :

(1) Digitalisation des courbes de niveaux à partir de cartes topographiques. Les documents de base étaient des cartes topographiques au 1/5.000^{ème} fournies par l'Agence Nationale des Autoroutes (ANA) ;

(2) Interpolation des données digitalisées.

Il existe dans la littérature beaucoup de méthodes d'interpolation. L'application de ces méthodes sur les mêmes données peut produire des résultats différents. Ces méthodes permettent d'obtenir des valeurs d'élévation à l'intérieur de la structure matricielle en se basant sur les données ponctuelles. Les valeurs situées entre celles qui sont échantillonnées sont alors estimées de diverses manières, c'est ce qui nous a permis d'obtenir les modèles numériques de terrain à l'aide des courbes de niveau de la figure 31.

La précision d'une interpolation dépend de plusieurs éléments comme les propriétés de la surface, le nombre de points échantillonnés, la méthode d'échantillonnage des points, l'espacement des points et la méthode d'interpolation (Desmet et Govers, 1996; Weng 2002). Il existe plusieurs méthodes d'interpolation: l'Inverse de la Distance Pondéré (IDW), le Krigeage, la Fonction Spline, le Réseau Triangulaire Irrégulier (TIN), l'interpolation Linéaire, l'interpolation Bivariée, etc. Certaines de ces méthodes sont exactes, l'interpolation passant par tous les points d'élévations, tandis que d'autres sont approximatives, l'interpolation consiste à un ajustement qui tend à passer par tous les points. De plus, certaines des méthodes dites globales, utilisant l'ensemble des points pour déterminer l'ajustement à appliquer lors de l'interpolation, tandis que d'autres sont locales et ne tiennent compte que des mesures d'élévation localisées à proximité du pixel à interpoler.

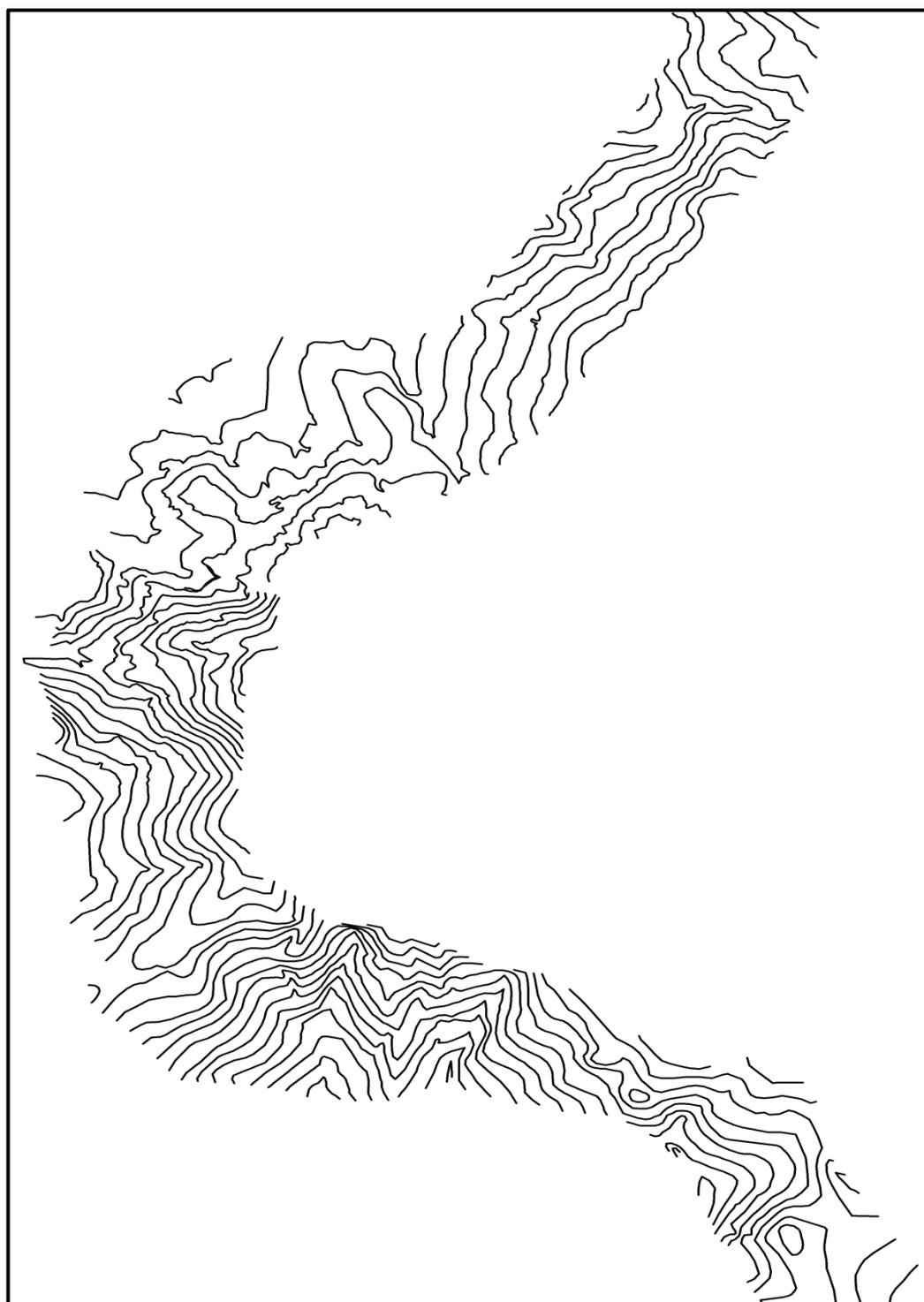


Figure 31. Courbes de niveau qui ont servi à la création du MNT (partie centrale de la zone d'étude)

Toutes ces méthodes ont leurs forces et leurs faiblesses. Certaines méthodes d'interpolation apportent des effets d'oeil de boeuf, comme l'inverse des distances (Weng, 2002). Certaines peuvent donner de bons résultats pour un type de topographie et donner une piètre performance pour un autre territoire. Par exemple, la Fonction Spline, une méthode globale approximative, donne de bons résultats dans les environnements de faible topographie (Desmet et Govers, 1996). Dans ce qui suit, une courte description des méthodes d'interpolation couramment utilisées dans la littérature.

- **Inverse de la Distance Pondéré (IDW)**

L'Inverse de la Distance Pondéré est une méthode déterministe exacte et locale. Elle consiste à utiliser les données d'élévation localisée à proximité du pixel à interpoler pour déterminer sa valeur (Fig.32). En effet, plus un pixel est proche d'un point d'élévation, plus il risque d'avoir une élévation semblable à ce point. Toutefois, plus un point est éloigné du pixel à interpoler, plus son poids dans le modèle sera faible.

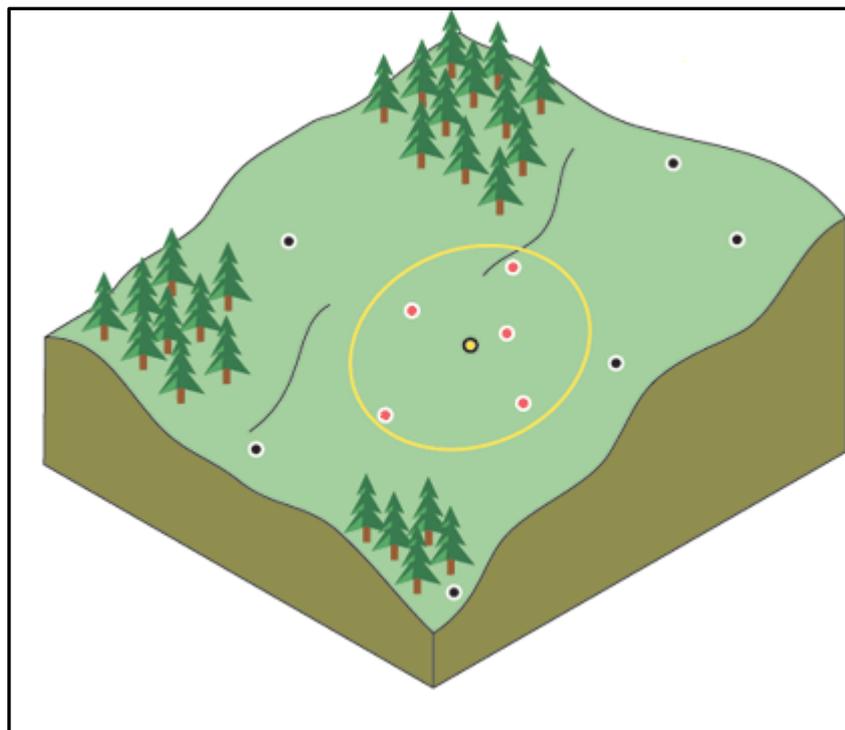


Figure 32. Utilisation de points d'élévation pour l'interpolation de l'élévation d'un point précis (en jaune) [source : manuel «Using ArcGIS Geostatistical Analyst» (ESRI 2009)]

○ **Krigeage**

Le krigeage est une méthode d'interpolation probabiliste (Weng 2002; Chaplot et al., 2006). Il prévoit la valeur d'un phénomène naturel en des sites non échantillonnés par une combinaison linéaire sans biais et à variance minimale des observations du phénomène en des sites voisins (Fig. 33). Les trois types classiques de krigeage sont : Ordinaire, Simple et Universel. Dans tous les cas, il s'agit d'une méthode statistique très flexible, exacte ou inexacte selon les résultats voulus, permettant la génération d'une cartographie de la probabilité de l'erreur.

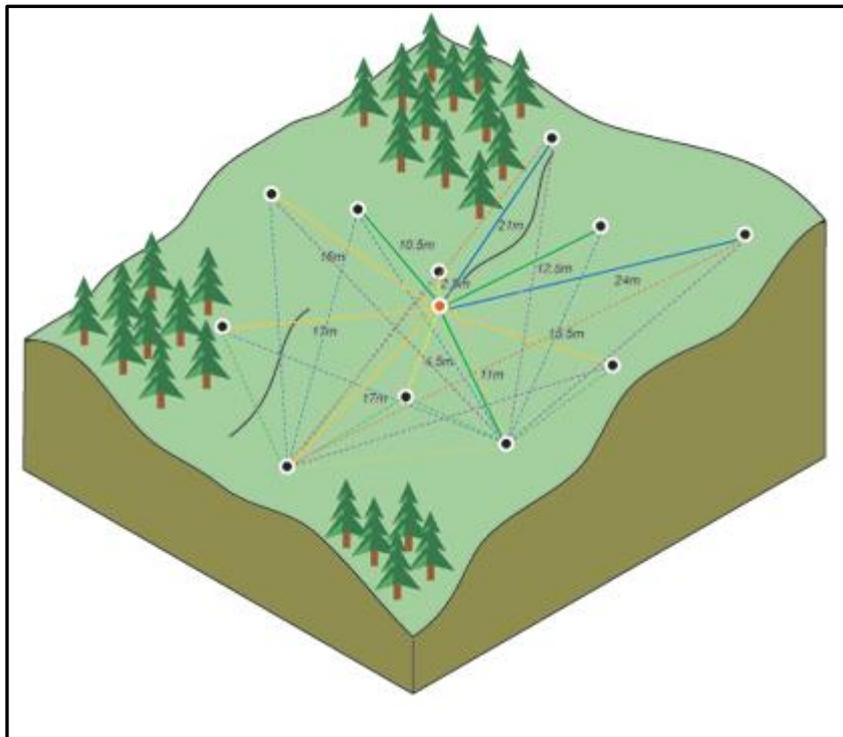


Figure 33. Principe de l'interpolation par krigeage [source : manuel «Using ArcGIS Geostatistical Analyst» (ESRI 2009)]

○ **Réseau Triangulaire Irrégulier (TIN)**

Les TIN constituent une forme de données géographiques numériques vectorielles et sont construits en triangulant un ensemble de sommets (points). Les sommets sont reliés à une série de segments pour former un réseau de triangles représentant l'élévation du territoire (Fig.34). Il existe différentes méthodes d'interpolation pour former ces triangles, tels que la triangulation de Delaunay ou le classement des distances. ArcGIS prend en charge la méthode de triangulation de Delaunay (Alexander,2009).

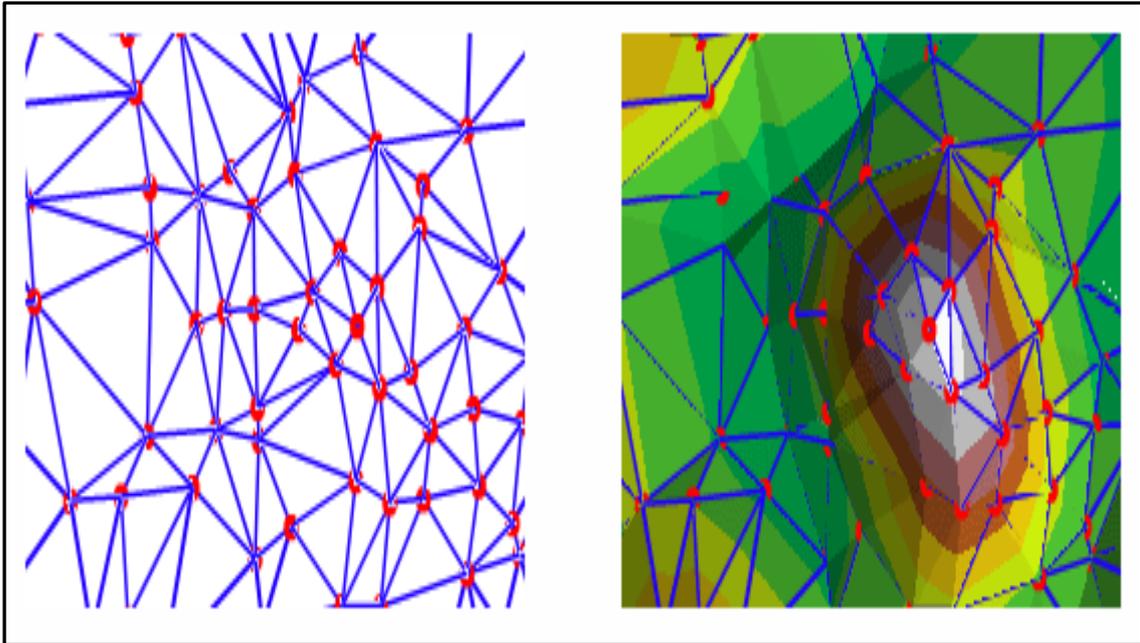


Figure 34. Réseau de triangles représentant l'élévation (TIN) [Source : manuel «Using ArcGIS Geostatistical Analyst» (ESRI 2009)]

○ ANUDEM

C'est une méthode d'interpolation basée sur le module ANUDEM (Australian National University Digital Elevation Model). Ce module a été développé par Michael Hutchinson (Hutchinson et Dowling, 1991). La procédure d'interpolation est optimisée pour obtenir une vitesse d'exécution semblable aux méthodes locales tout en tenant compte des données de façon globale. De plus, comparativement aux autres méthodes, elle permet d'utiliser facilement et efficacement les courbes de niveau. Elle impose aussi des conditions de drainage provenant d'un réseau hydrologique orienté en plus d'éliminer les dépressions. Cette méthode permet de générer un MNT hydrologiquement réaliste.

Les méthodes d'interpolation permettent généralement d'obtenir un modèle numérique de terrain en format matriciel. Lorsque ce n'est pas le cas (ex : TIN), il est toujours possible de transférer le MNT en matrice. Par la suite, afin d'être en mesure de délimiter les bassins versants, une matrice d'écoulement est créée à partir du MNT.

Dans cette étude, l'interpolation a été effectuée par les méthodes : **TIN** (Triangulated irregular network) et **ANUDEM** (Australian National University DEM) (Hutchinson *et al.*, 2011). Ce qui nous a permis d'obtenir les modèles numériques de terrain de la figure 35 et 36.

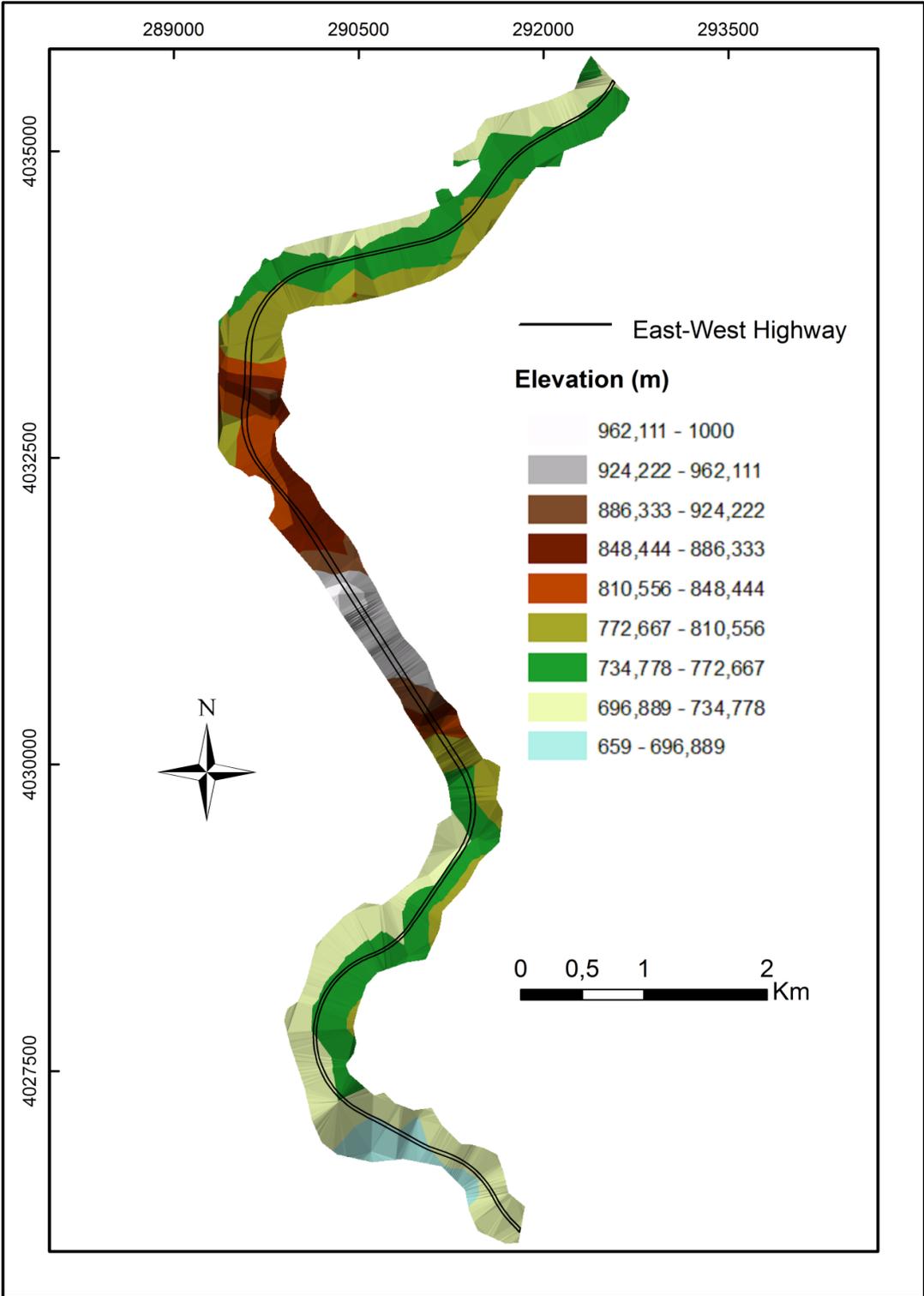


Figure 35. MNT de la zone d'étude (TIN)

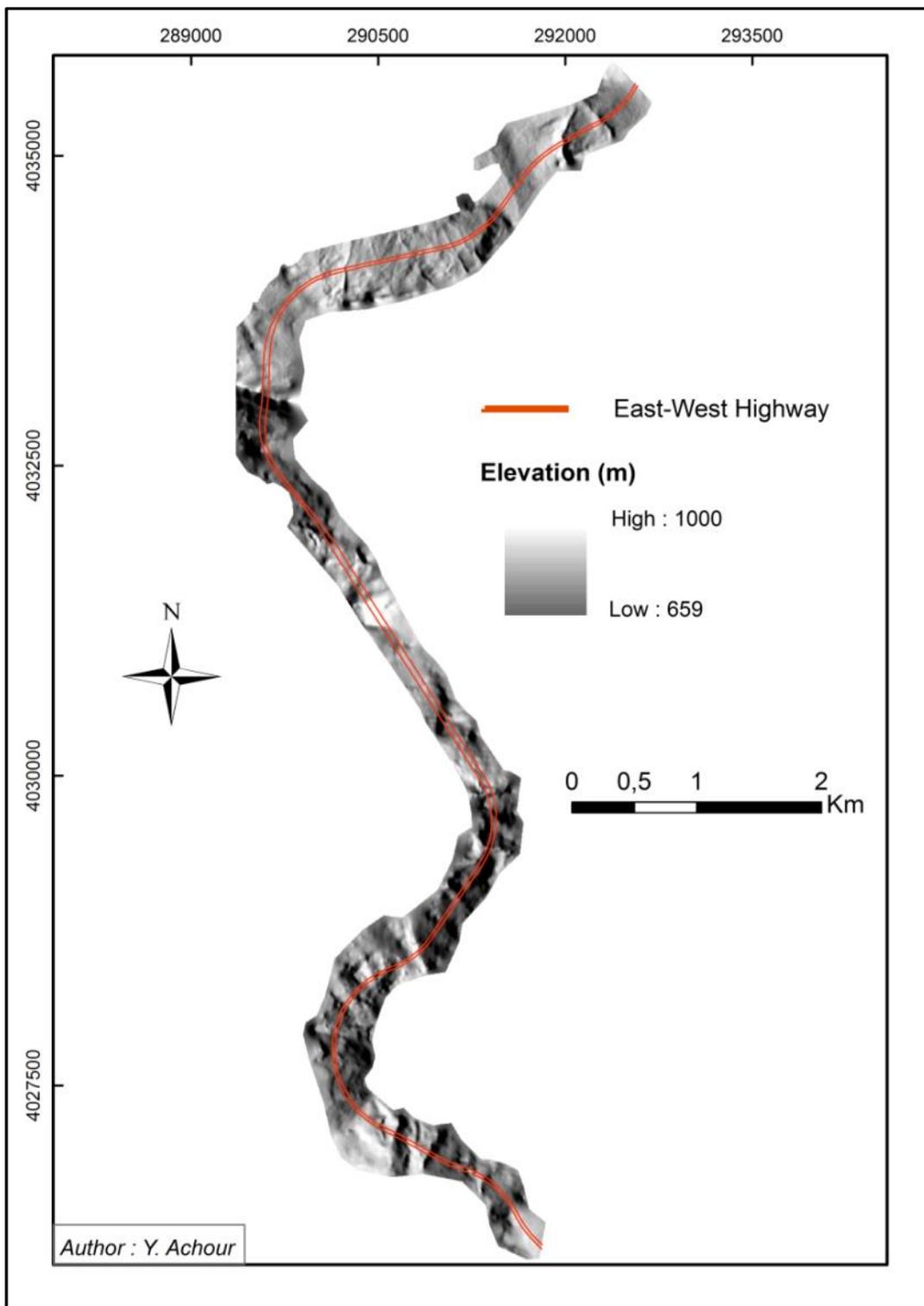


Figure 36 : MNT de la zone d'étude (ANUDEM)

Après la création des MNT, une procédure d'évaluation de leur qualité par une approche qualitative a été réalisée. Elle est basée sur l'observation des dérivés de MNT (pente) et a permis de faire le choix final du MNT qui sera utilisé dans cette étude.

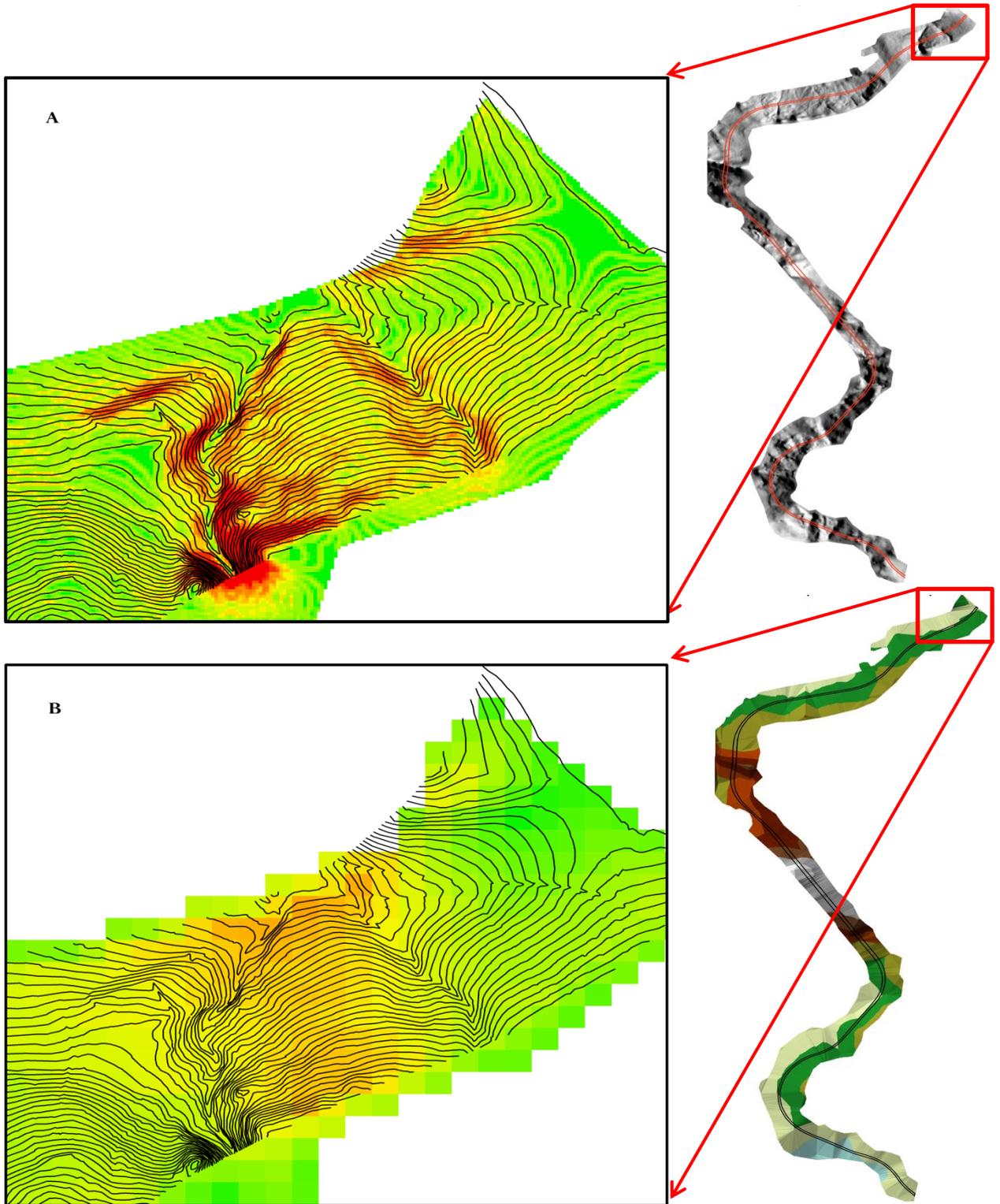


Figure 37. Comparaison de dérivé (pente) pour les MNT interpolés par : A) ANUDEM, B) TIN (Exemple de la partie extrême Nord du site d'étude)

La figure 37 montre clairement la différence entre les deux méthodes d'interpolation. Contrairement à la méthode TIN, La méthode ANUDEM permet de générer un MNT hydrologiquement réaliste. Cette méthode utilise une technique d'interpolation spécialement conçue pour créer au mieux une surface de drainage naturel et préserve à la fois les lignes de crête ainsi que les réseaux de cours d'eau. Le modèle numérique de terrain qui a été créé par cette méthode est donc suffisamment précis afin que l'on puisse l'utiliser pour le reste de cette étude.

La taille du pixel du MNT a été fixée à cinq mètres de côté. La première raison de ce choix est le rapprochement des courbes de niveau qui ont servi à la construction du MNT à partir des cartes fournies par l'ANA. La deuxième est la taille du site d'étude (5.83 km²) qui se prête bien à cette taille de pixel : un pixel ayant une superficie de 25 m².

L'extraction des paramètres morphologiques de terrain constitue une étape de base du traitement par SIG du MNT. Le gradient de pente et l'exposition des versants sont considérés comme les facteurs géomorphologiques les plus importants qui influent sur la stabilité des pentes (Dai et Lee, 2002; Guzzetti et al, 2005; Galli et al, 2008).

3.1.1. Le gradient de pente

Dans la zone d'étude, le terrain est complexe car il est fortement accidenté et contient des pentes assez prononcées. La pente joue un rôle primordial dans l'occurrence des glissements de terrain. Il s'agit certainement de la variable la plus utilisée dans l'étude des glissements de terrain (Lee et Min, 2001; Cevik et Topal, 2003). La pente est une composante essentielle dans l'analyse de la stabilité, elle est directement liée au potentiel gravitationnel et donc à la contrainte de cisaillement à laquelle sont soumis les matériaux. Les gradients de pente ont, par conséquent, une grande influence sur la susceptibilité des versants aux glissements.

La carte des pentes du site étudié est dérivée du MNT (Fig.36) sous la forme d'une carte raster avec la même taille de pixel que le MNT. Une classification des classes de pente est effectuée en divisant les angles de pente en cinq classes différentes (Fig.38) : (i) [0 - 5 °], (ii) [5 - 10 °], (iii) [10 - 15 °], (iv) [15 - 25 °] et (v) [> 25 °]. (Das et al., 2012)

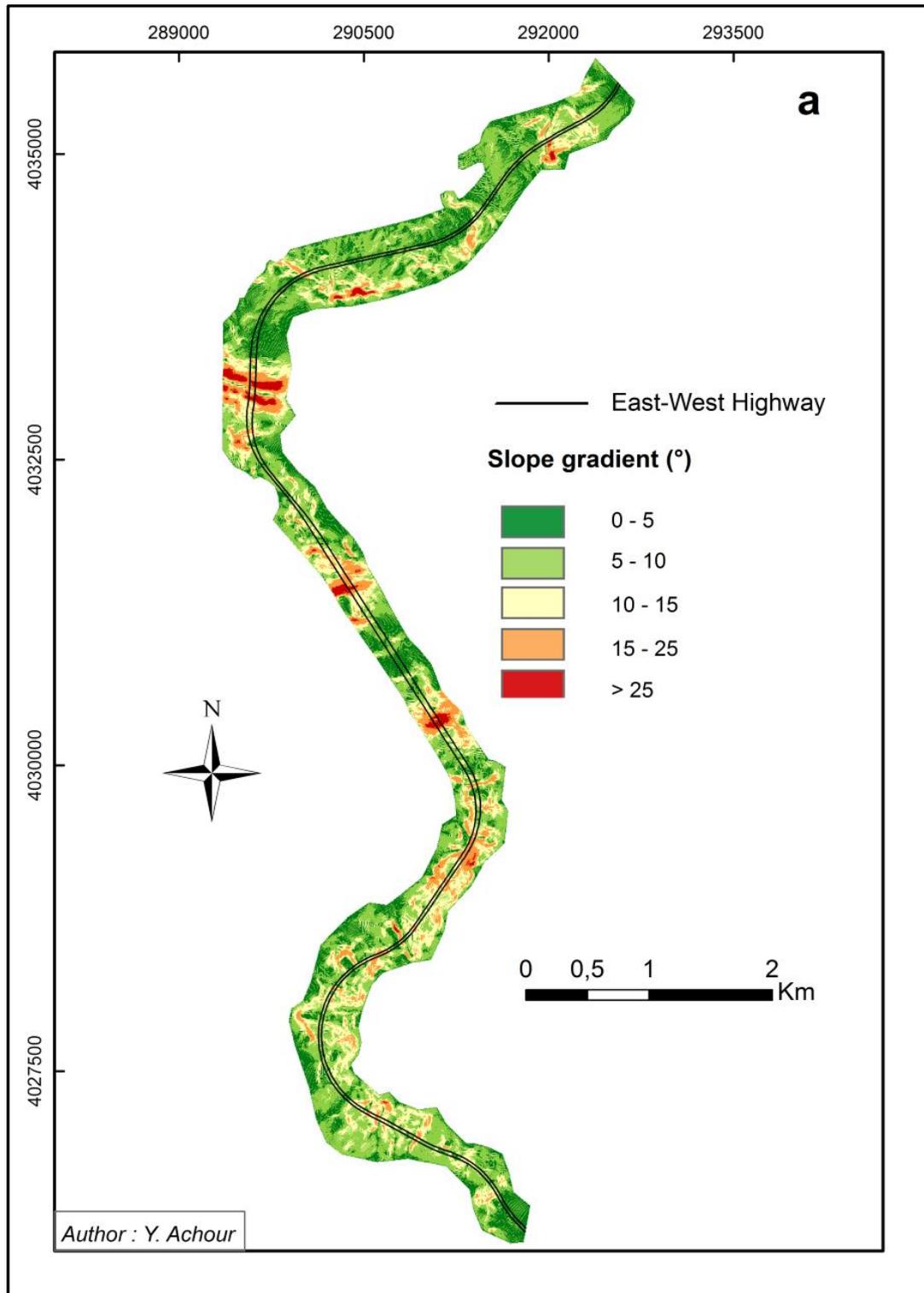


Figure 38. Carte des pentes de la zone d'étude (d'après : Achour et al., 2017)

L'analyse statistique des données extraites de la carte des pentes indique que les pentes comprises entre $[0 - 5^\circ]$, $[5 - 10^\circ]$ et $[10 - 15^\circ]$ sont dominantes dans le site d'étude, avec des pourcentages de 24.24 %, 43.51 % et 22.07 %, respectivement. Les deux autres classes occupent seulement 10.18 % de la surface totale. Cependant, la présence des glissements de terrain dans la classe $[10 - 15^\circ]$ atteint un pourcentage important de 49.61 % suivie par les classes $[15 - 25^\circ]$ et $[5 - 10^\circ]$. Un nombre très minime de glissements de terrain se produit dans les classes $[0 - 5^\circ]$ et $[> 25^\circ]$. L'abondance de glissements de terrain dans les classes à pente moyenne s'explique par le fait qu'une grande partie de ces glissements sont, beaucoup plus, d'origine anthropique. La figure 39 montre le pourcentage de différentes classes de pente et le pourcentage de glissements de terrain survenus dans ces classes de pente.

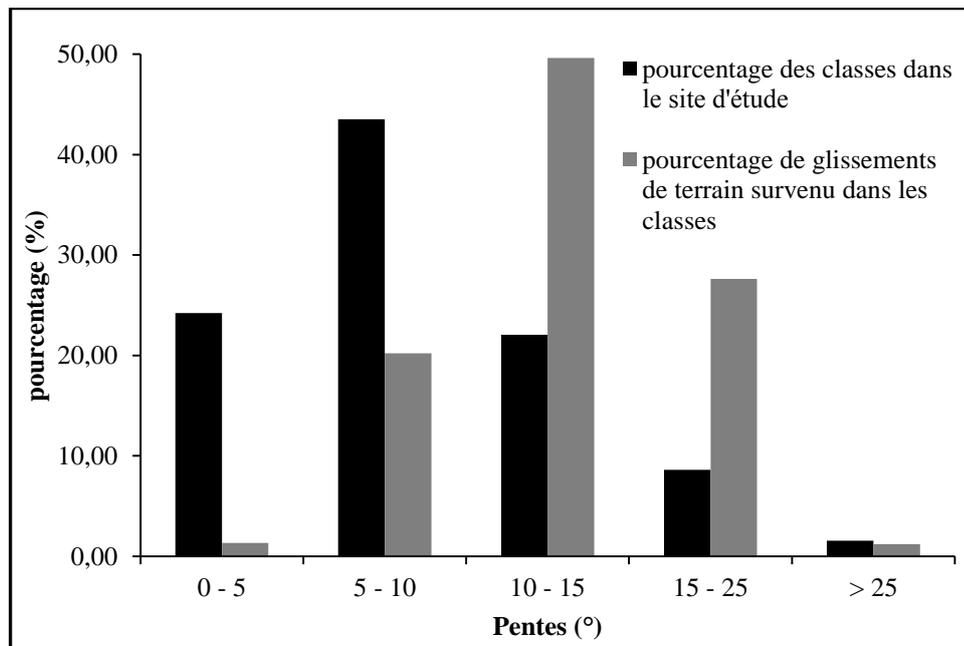


Figure 39. Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de pente et le pourcentage de glissements de terrain survenus dans ces classes de pente

3.1.2. L'exposition des versants

Comme le gradient de pente, l'exposition des versants joue un rôle essentiel dans l'occurrence des glissements de terrain. Dewitte (2006) a noté que l'orientation des versants peut influencer les propriétés physiques de la pente et donc sa susceptibilité aux mouvements. Plusieurs facteurs sont influencés par l'orientation des pentes : la radiation reçue du soleil et la végétation. Ces dernières peuvent aussi influencer la résistance des sols et donc la susceptibilité aux glissements.

La carte de l'exposition des versants de la zone d'étude (Fig.40) contient huit classes : (i) Nord (N), (ii) Nord-est (NE), (iii) Est (E), (iv) Sud-est (SE), (v) Sud (S), (vi) Sud-ouest (SW), (vii) Ouest (W) et (viii) Nord-ouest (NW).

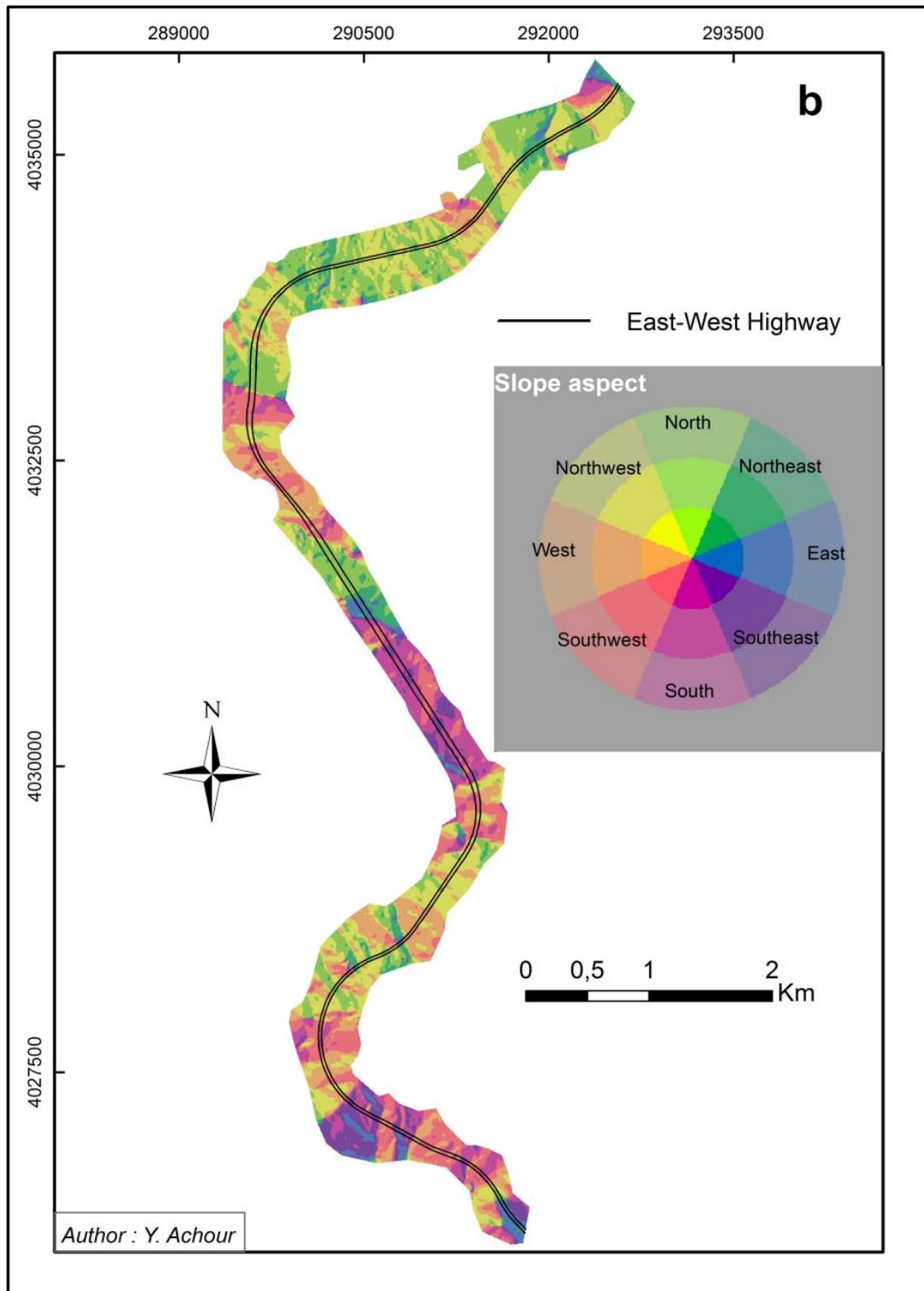


Figure 40. Carte de l'exposition des versants de la zone d'étude (d'après : Achour et al., 2017)

L'analyse de la figure 41 nous a permis de constater que les glissements sont localisés beaucoup plus sur les versants orientés vers le Nord-Ouest soit 23.30 % (la classe la plus influente) suivie par les versants orientés vers le Nord (20.41%), vers l'Ouest (17.06 %) et enfin vers le Sud-Ouest avec un pourcentage de 14.71 %. Ces quatre orientations présentent des densités et superficies supérieures comparativement aux autres. Il y a risque que d'autres glissements se produisent dans ces zones dans le futur.

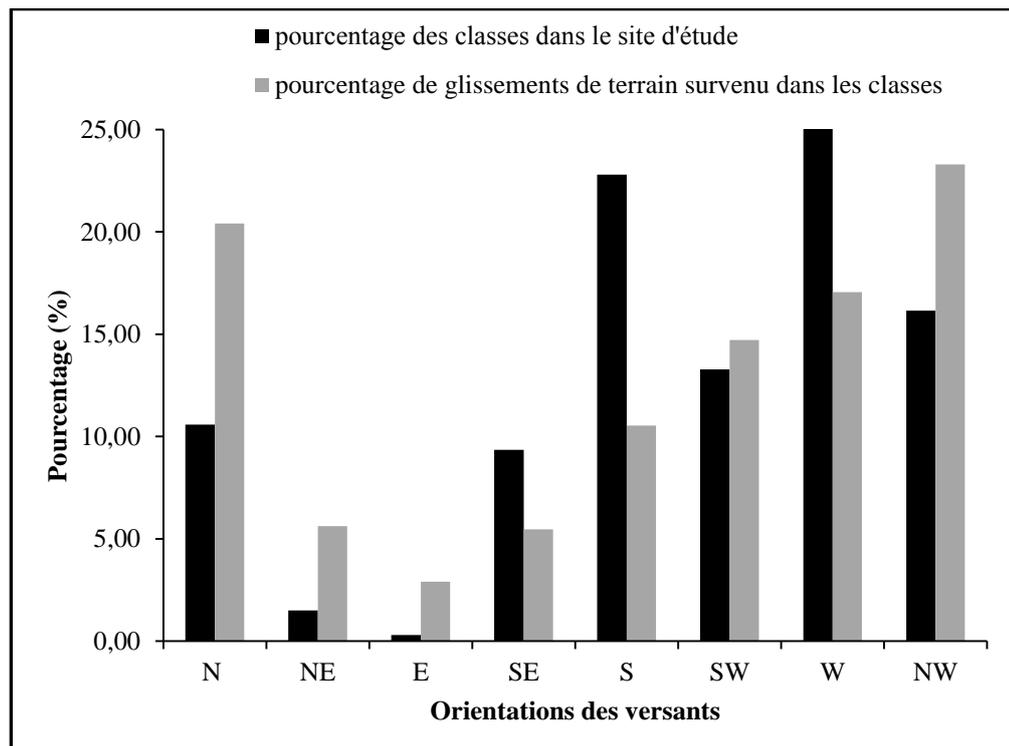


Figure 41. Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de l'exposition de pentes et le pourcentage de glissements de terrain survenus dans ces classes

3.2. Lithologie

La lithologie d'une région influe fortement sur la stabilité des pentes. Il existe une relation étroite entre ce facteur et l'occurrence de glissements de terrain. Une attention particulière doit être accordée à la lithologie d'une région parce que la plupart des ruptures de pente sont peu profondes, impliquant donc des dépôts près de la surface. Elle est considérée comme un facteur causatif fondamental dans cette étude.

Les données lithologiques ont été extraites directement sous la forme d'une couche vectorielle à partir de la carte géologique d'El Aria au 1/50 000^{ème}, complétée par des observations de terrain. Ces données ont été simplifiées aux fins de l'analyse de la susceptibilité aux glissements de terrain (Fig.42). Les différents types de lithologie rencontrés sont subdivisés en 12 formations de faciès et âges géologiques différents (Tab.6).

Tableau 6. Formations géologiques rencontrées dans la zone d'étude

Formation	Age	Superficie (%)
Eboulis récents	Quaternaire	6,01
Terres arables	Quaternaire	24,13
Glacis anciens à galets patinés	Salétien	2,25
Conglomérats et argiles sableuses	Mio-Pliocène	11,24
Grès Numidiens	Oligocène	22,11
Marne et argile à grands blocs	Priabonien	15,51
Calcaires clairs	Yprésien-Lutétien inférieur	0,06
Calcaires à silex	Yprésien-Lutétien inférieur	0,80
Marnes noires à boules jaunes	Maestrichtien - paléocène	11,59
Calcaire du Djbel Oum Settas	Cénomaniens	2,27
Calcaire à Miliolidés, Orbitholines	Aptien	2,69
Calcaire dolomitique	Barrémien	1,34

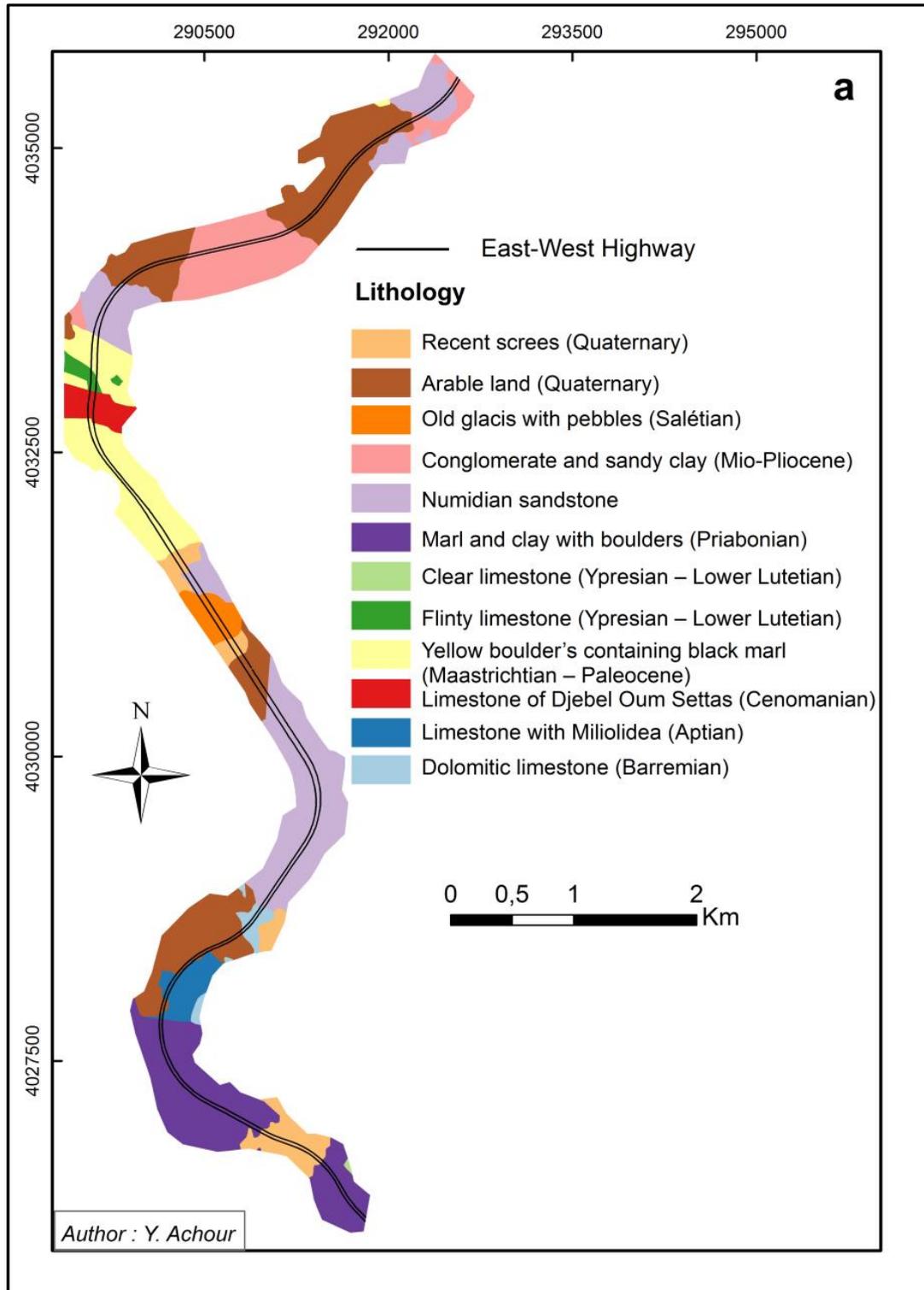


Figure 42. Carte lithologique simplifiée de la zone d'étude (d'après : Achour et al., 2017)

Note :

Comme les couleurs sont partie intégrante d'une stratégie de communication, alors on a choisi une gamme de couleurs classiques et qui ne reflète pas les normes internationale des cartes géologiques, dont le but non seulement pour éviter le risque

d'une source de confusion d'interprétation, mais aussi pour une meilleure lecture de la carte ci-dessus.

Deux coupes géologiques au niveau des deux tunnels (1 et 2) ont été réalisées lors des études de l'avant-projet détaillé du tronçon autoroutier situé au sein de notre zone d'étude (Fig.43).

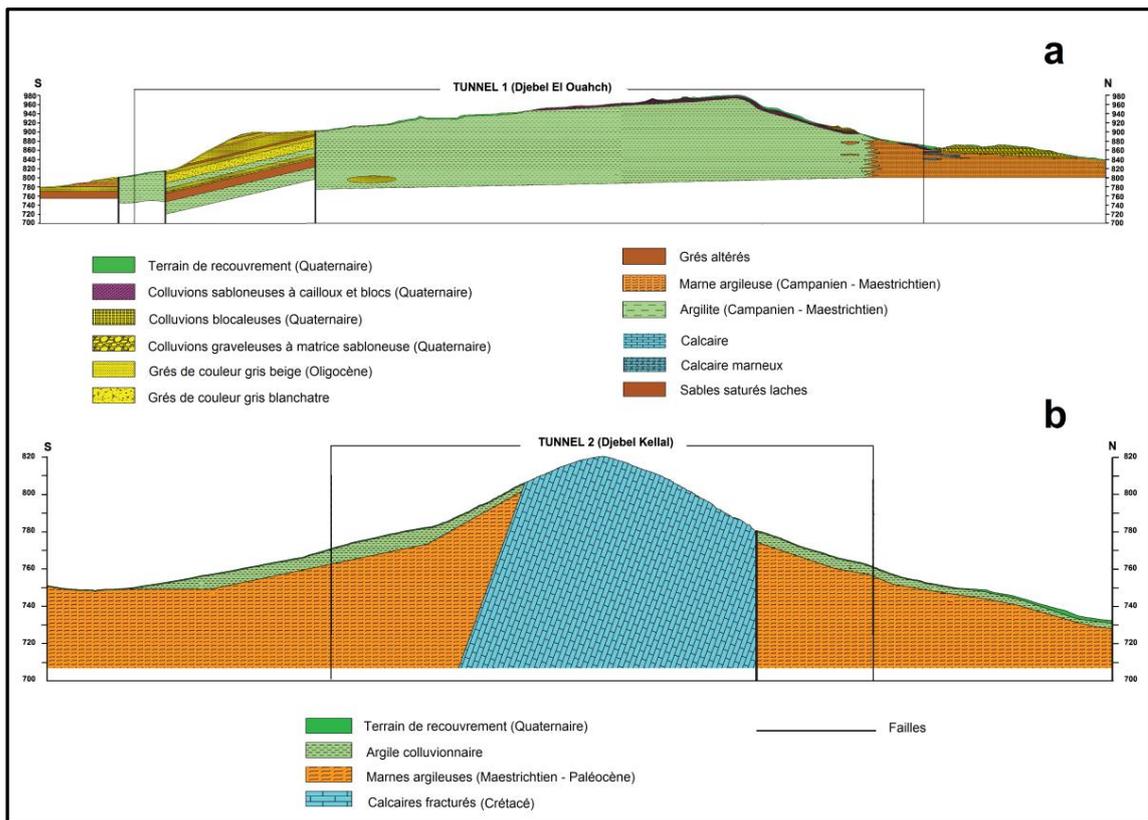


Figure 43. Coupes géologiques, (a) : au niveau du tunnel 1, (b) : au niveau du tunnel 2 (modifiées, d'après : ANA, 2007)

L'analyse de la figure ci-dessus permet de constater ce qui suit :

- Les grès oligocènes occupent la partie sud du tunnel 1, en particulier son portail Sud, où ils sont très disloqués et fracturés (Photo.6). Ces grès se présentent en banc épais, de direction Nord-Sud et de pendage 20° Est. Ils sont découpés par un réseau de fractures d'espace décimétrique. Les fractures observées sont de fort pendage (60 à 90°) et de directions: N 50 à N 70°E, N 80 à N 90°E et N 160°E.
- Pour le tunnel 2, trois formations lithologiques sont reconnues : les colluvions quaternaires, les marnes crétacées allochtones et les calcaires néritiques crétacés.

Sur le plan structural, les calcaires correspondent à une structure monoclinale de direction sensiblement Est-Ouest (perpendiculaire au tunnel), et de fort pendage (60° à 90° Sud). Les marno-calcaires sont très fracturées et montrent deux directions de fractures rapprochées : N 110 et N 150°Est (Photo.7).



Photo 6. Grès Oligocènes très fracturés (photo prise pendant les études de l'avant-projet détaillé dans la section étudiée. Source : ANA, 2007)



Photo 7. Marne dégradée (photo prise pendant les études de l'avant-projet détaillé dans la section étudiée. Source : ANA, 2007)

3.3. Proximité aux failles

Selon Pachauri et al. (1992), la considération de l'activité sismique dans la prédiction des glissements de terrain se traduit parfois par la prise en compte de l'accélération sismique et/ou de la proximité aux failles.

Il y a beaucoup de failles dans la zone d'étude. Ces failles ont été dérivées de la carte géologique de la région (Fig.44) et ont été mises à jour par un travail important de terrain. La carte thématique « proximité aux failles » a été produite par la création de zones tampons autour des lignes (failles), et a été classifiée en six classes: (i) [0 - 50 m], (ii) [50 - 150 m], (iii) [150 - 250 m], (iv) [250 - 550 m] et (v) [550 - 850 m] et (vi) [$>$ 850 m] (Fig.45).

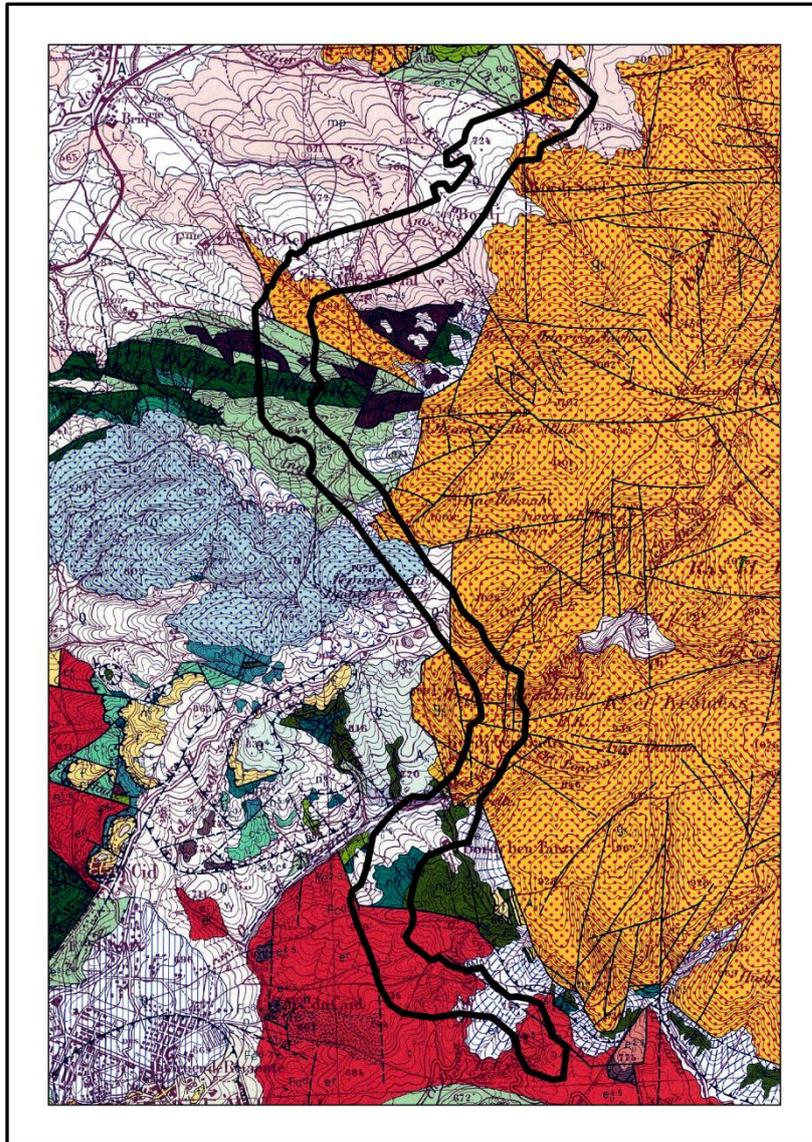


Figure 44. Extrait de la carte géologique de la zone d'étude

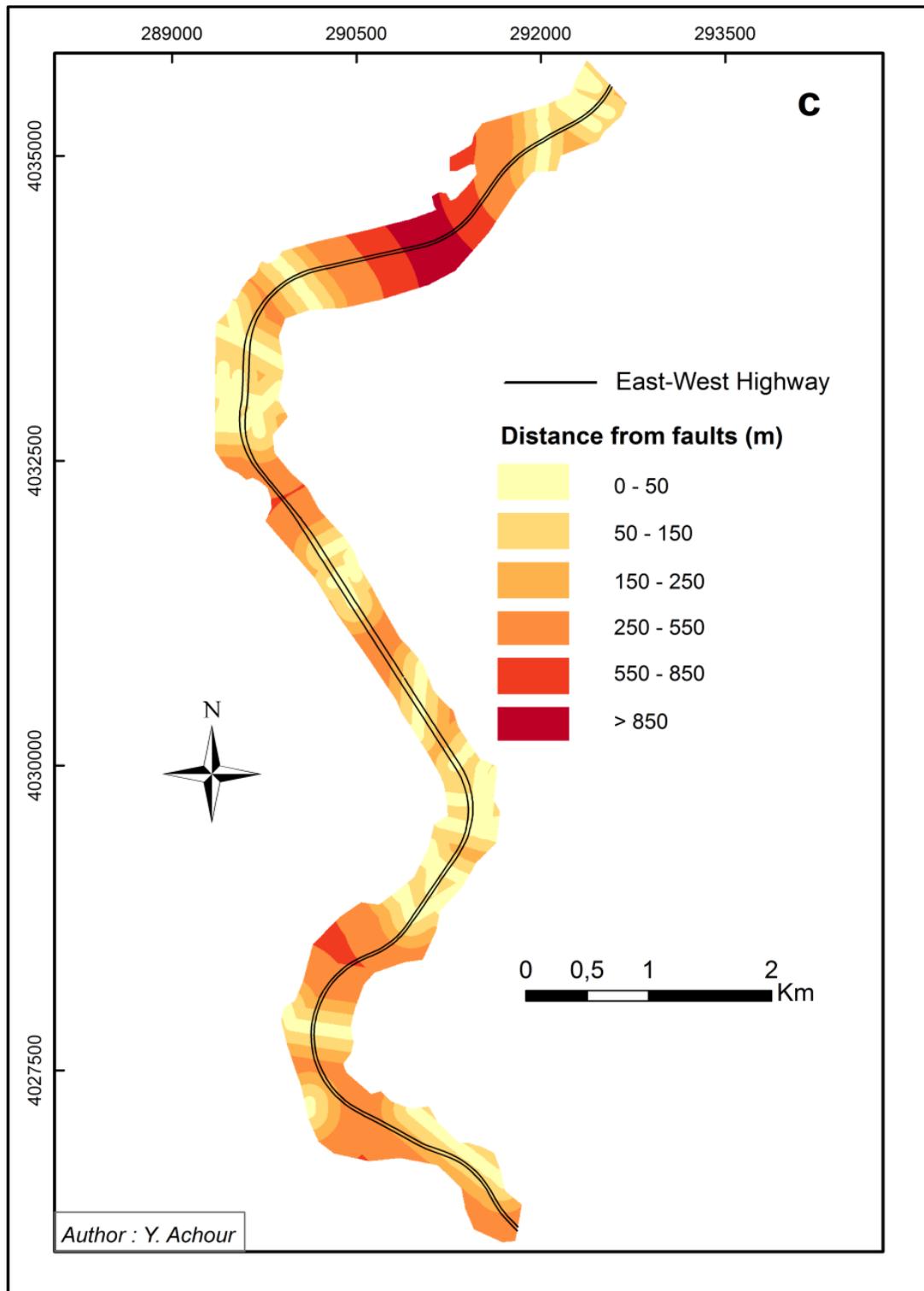


Figure 45. Carte de proximité aux failles (d'après : Achour et al., 2017)

À partir de la figure 46 on constate que les classes de 0 – 50 m et 50 - 150 m sont les plus abondantes dans la zone d'étude et que la grande partie des glissements se localise dans les terrains distants de moins de 550 m des failles.

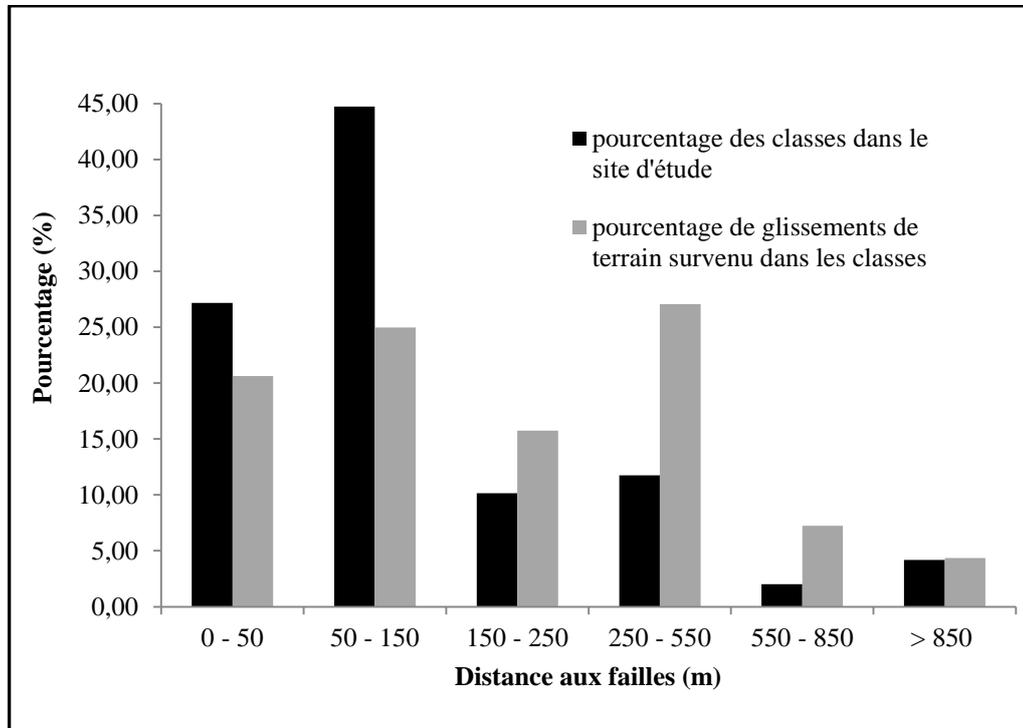


Figure 46. Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de la proximité aux failles et le pourcentage de glissements de terrain survenus dans ces classes

3.4. Proximité au réseau hydrographique

Certains mécanismes de glissements de terrain correspondent à l'action érosive des cours d'eau. Le réseau de drainage peut avoir une influence sur la distribution des zones instables (glissements de terrain) en modifiant le comportement du terrain par l'érosion des ravins qui peut initier la rupture des pentes. Différentes études, comme celles de Dai et Lee (2001, 2002), ont mis en évidence l'influence du réseau de drainage sur la distribution des glissements de terrain.

La distance au réseau hydrographique est un facteur qui joue un grand rôle dans la mise en place des glissements, selon que la pente se trouve à proximité des cours d'eau ou non. Cette couche de données représente la distance euclidienne au réseau de drainage. Ainsi, les classes suivantes sont retenues : (i) [0 - 50 m], (ii) [50 - 100 m], (iii) [100 - 150 m], (iv) [150 - 200 m] and (v) [> 200 m] (Fig.47).

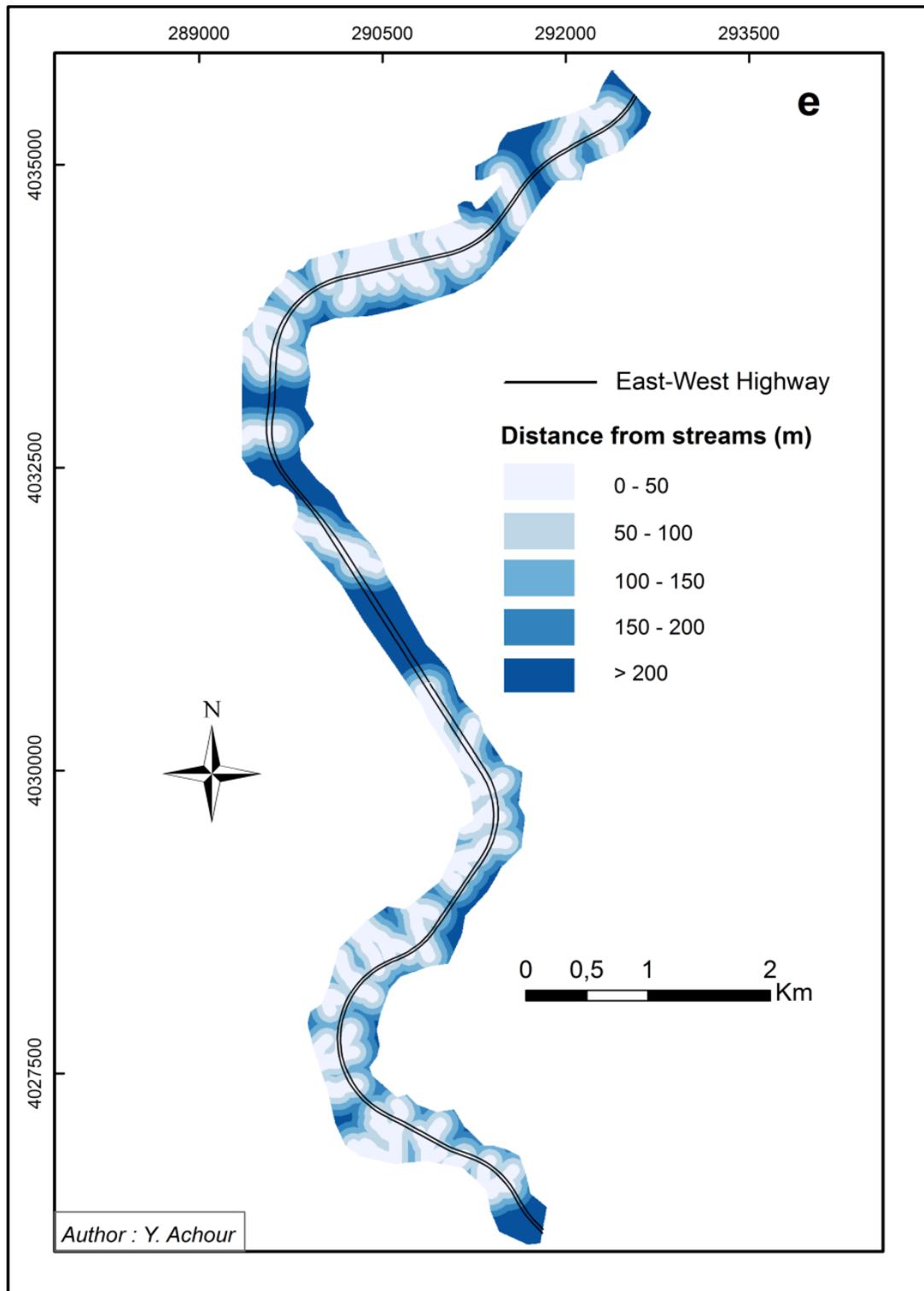


Figure 47. Carte de proximité au réseau hydrographique (d'après : Achour et al., 2017)

La même analyse statistique a été menée pour percevoir la distribution spatiale des glissements de terrain en fonction de la distance aux cours d'eau. La figure 48 met en évidence une influence forte à proximité des cours d'eau ; 32.16 % de glissements dans le secteur d'étude se trouvent entre 0 et 50 m des cours d'eau, 24.86 % entre 50 et 100 m, 17.36 % entre 100 et 150 m, 10.94 % entre 150 et 200 m et 14.68 % sont à plus de 200 m. Il est à noter que les classes 0 - 50 m et 50 - 100 m sont les plus abondantes dans cette zone.

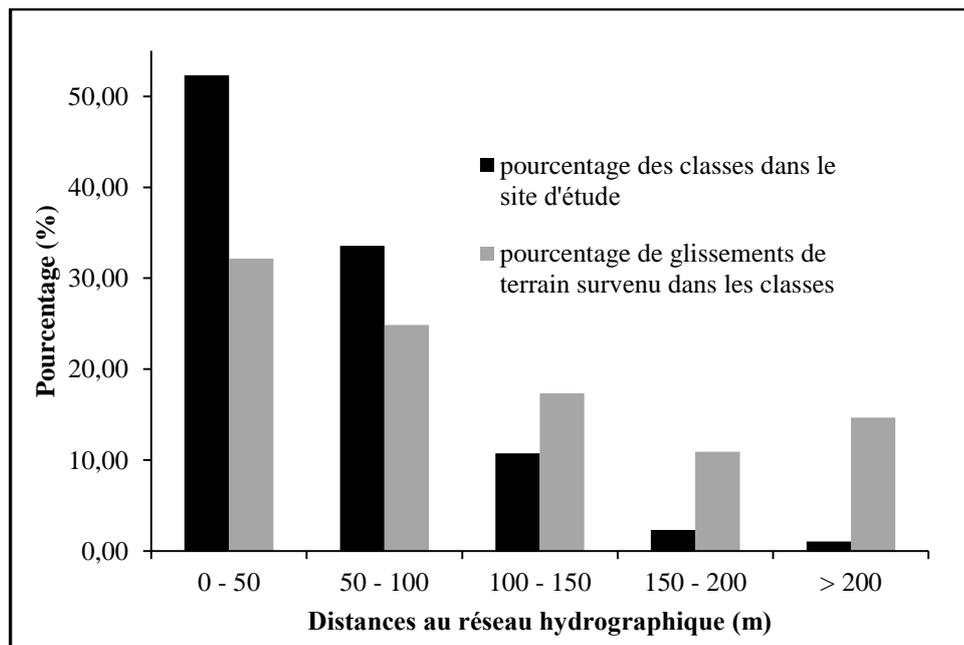


Figure 48. Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de la proximité au réseau hydrographique et le pourcentage de glissements de terrain survenus dans ces classes

3.5. Occupation du sol

L'occupation du sol est également un facteur très important dans la genèse des processus de glissements de terrain. Plusieurs études ont mis en évidence le rôle prépondérant de la végétation sur la stabilité des pentes et principalement lorsque des changements d'affectation interviennent (Jakob M., 2000; Montgomery et al., 2000; Glade, 2003).

La couche de données « occupation du sol » est obtenue, comme pour la lithologie, en convertissant les données vectorielles en images. Les trois classes d'occupation définies dans la zone d'étude sont : bâti, sols dénudés et culture (Fig.49).

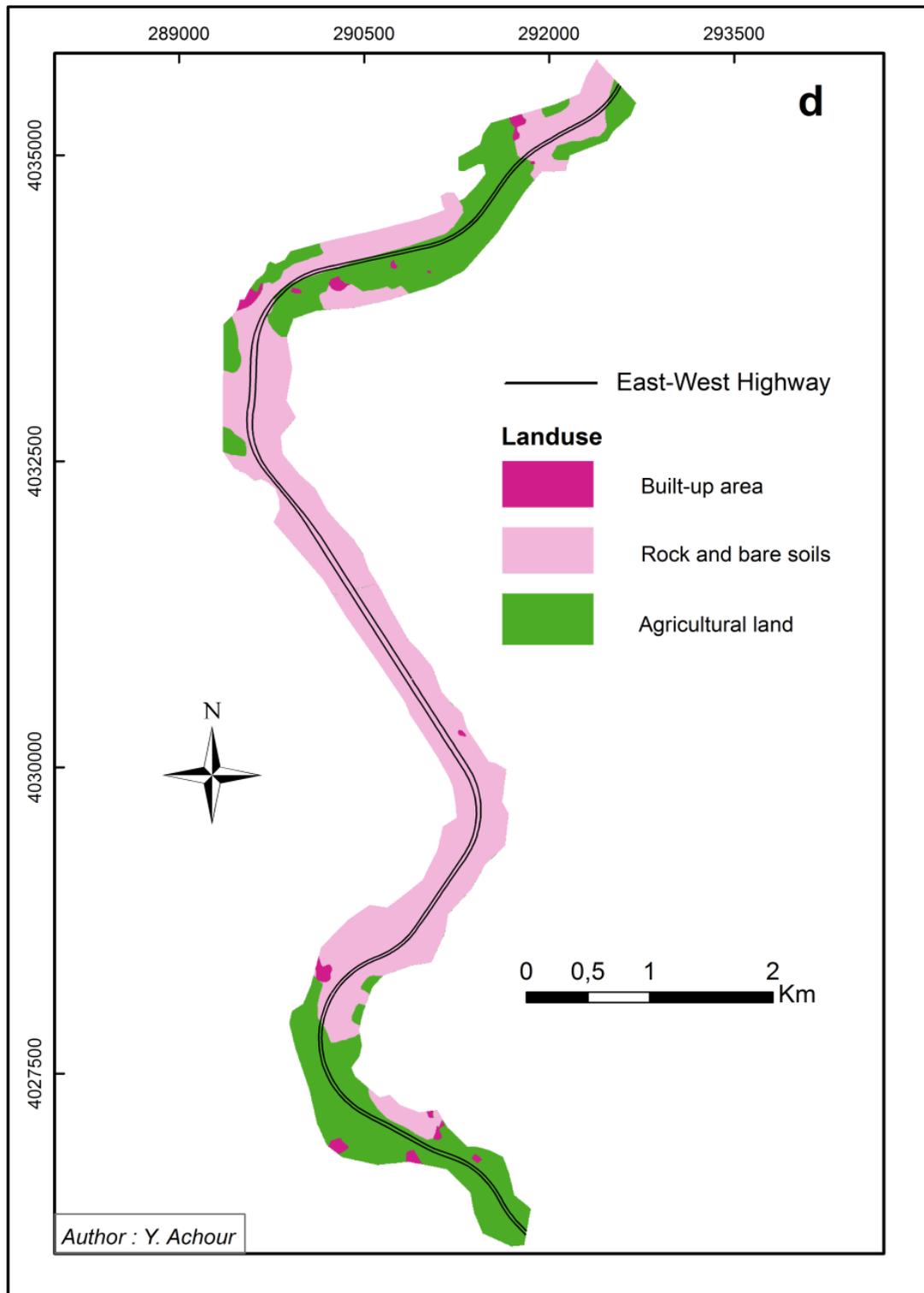


Figure 49. Carte d’affectation du sol (d’après : Achour et al., 2017)

Parmi les trois affectations que nous distinguons, les cultures et les sols dénudés sont les plus influents sur l’occurrence des glissements de terrain. Le bâti est très peu présent dans le secteur d’étude et par conséquent ne devrait pas influencer les glissements. (Fig.50)

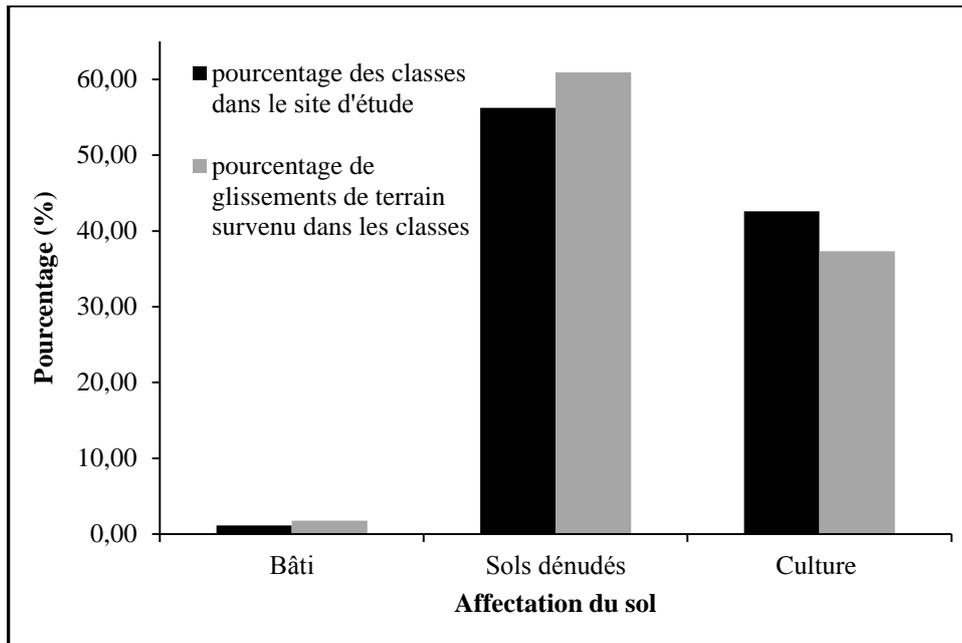


Figure 50. Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de l'occupation du sol et le pourcentage de glissements de terrain survenus dans ces classes

3.6. Paramètres géotechniques

Dans cette recherche, nous essayons d'appliquer une approche couplée déterministe-statistique, en raison de la disponibilité des données géotechniques. Nous avons jugé nécessaire d'introduire ces paramètres, car ils sont très interprétatifs dans la stabilité des pentes.

Les paramètres mécaniques utilisés dans cette étude sont l'angle de frottement interne et la cohésion. Les valeurs de ces paramètres ont été fournies par l'agence nationale des autoroutes. L'ANA a mené les investigations géotechniques dans l'axe de l'autoroute durant la période 2005 -2007. Plus de 45 forages ont été réalisés, la position de chaque sondage est illustrée dans la figure 51.

Deux couches thématiques (Figs.52 et 53) sont préparées en se basant sur les valeurs moyennes des paramètres mécaniques des formations superficielles rencontrées.

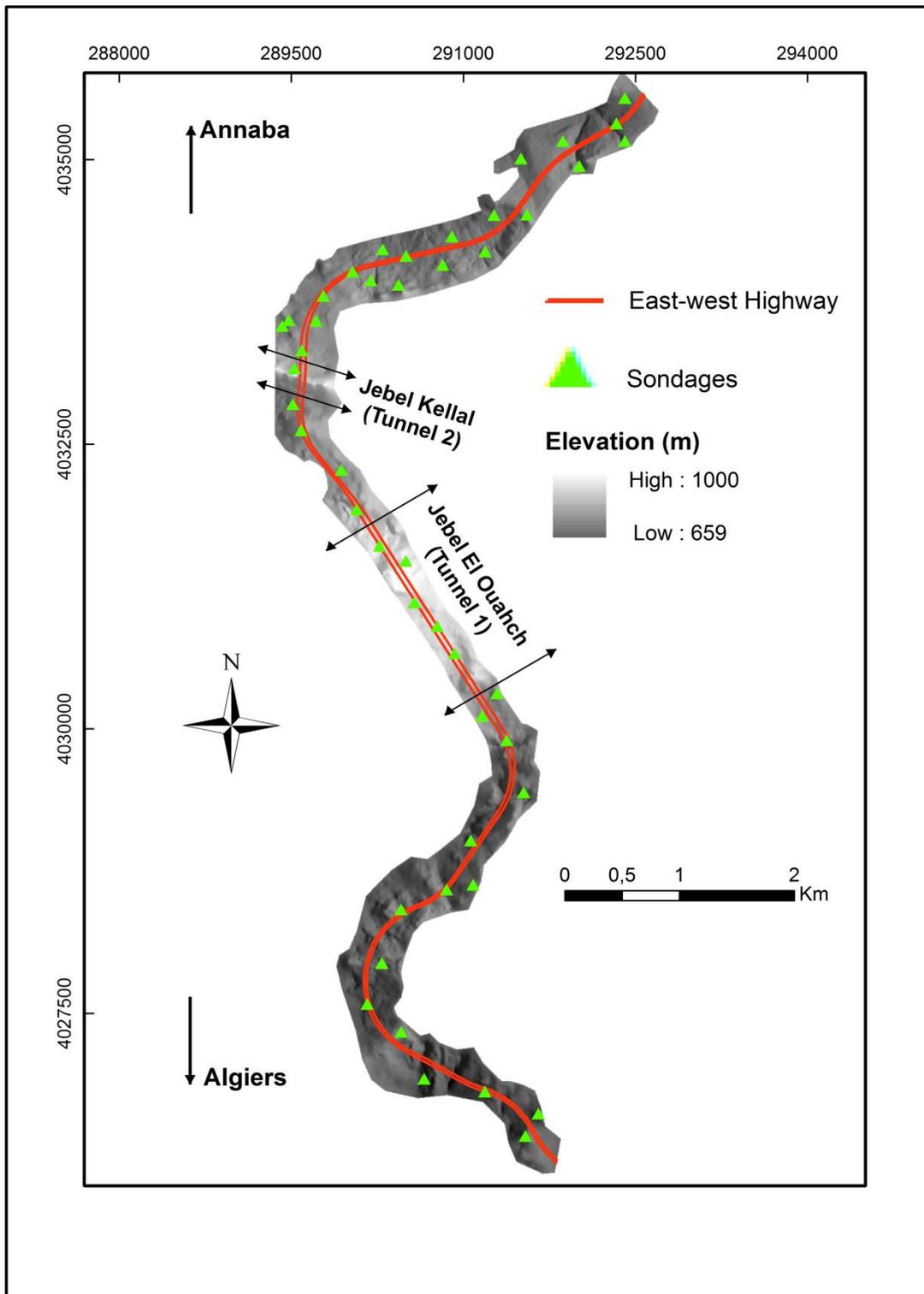


Figure 51. Localisation des sondages carottés réalisés par l'ANA dans la zone d'étude

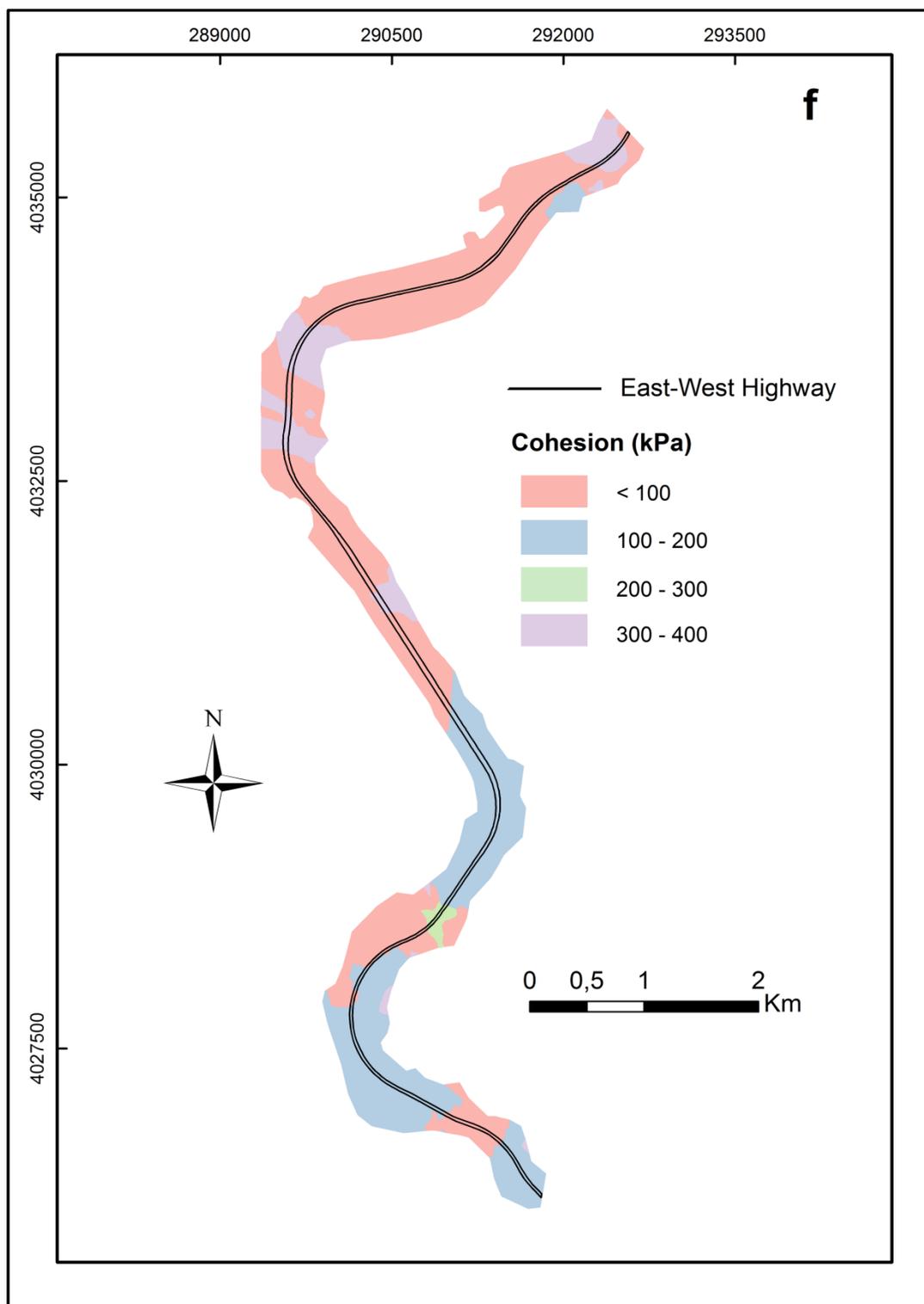


Figure 52. Carte thématique de la cohésion (d'après : Achour et al., 2017)

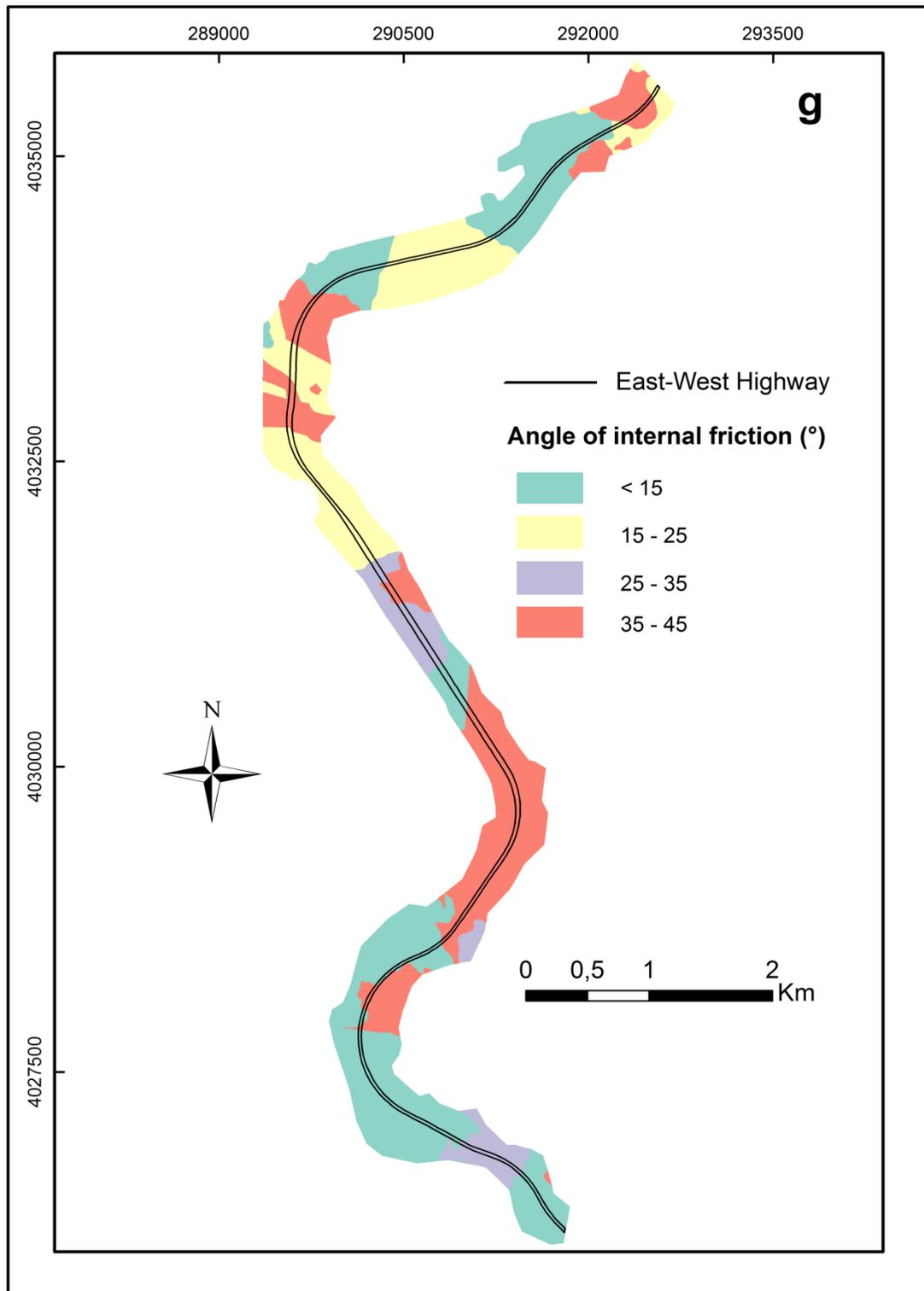


Figure 53. Carte thématique de l'angle de frottement interne (d'après : Achour et al., 2017)

4. Conclusion

Ce troisième chapitre a permis de détailler les différents jeux de données acquises et/ou créées spécifiquement en vue de la cartographie de la susceptibilité glissements de terrain. Ces données spatiales ont été obtenues, traitées et cartographiées à l'aide d'ArcGIS pour obtenir les cartes des huit paramètres de prédisposition en plus d'une carte d'inventaire. Dans l'ensemble, la carte d'inventaire des glissements de terrain constitue l'information de base pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans cette étude. Les facteurs de prédisposition utilisés dans cette étude se distinguent selon cinq catégories principales :

- Données topographiques ;
- Données géologiques ;
- Données sur l'occupation du sol ;
- Données hydrologiques ;
- Données géotechniques.

Ces différents jeux de données ont été constitués en fonction de l'échelle de travail visée pour la cartographie de la susceptibilité dans le secteur d'étude. Par ailleurs, huit couches de données ont été construites pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain.

Les différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain utilisées pour la production des modèles finals dans le secteur d'étude sont présentées dans le Chapitre 4.

Chapitre 4

Méthodologies d'évaluation et de
cartographie de la susceptibilité
aux glissements de terrain

1. Introduction

Les facteurs de prédisposition ont été définis dans le chapitre 3. À partir de ces derniers, il s'agit d'établir des règles de cartographie de la susceptibilité qui soient simples et aisément transposables sur des sites aux conditions environnementales proches. Plusieurs approches ont été définies dans le chapitre 1 et deux ont été choisies : une approche semi-quantitative sur la base de règles d'analyse Hiérarchique et une approche probabiliste représentée par une méthode bivariée dite : la pondération de l'information. Le choix d'une méthode d'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrains est lié à l'échelle de la zone étudiée : soit l'échelle locale d'un site instable ou d'un versant, utilisée pour définir le fonctionnement d'un phénomène et simuler des scénarios d'évolution; soit l'échelle large du bassin versant pour évaluer et cartographier la susceptibilité selon des critères morphologiques avec la production d'une cartographie prévisionnelle et préventive (Maquaire, 2002). Cependant, quel que soit l'échelle de la zone d'étude, la qualité des résultats dépend avant tout de la qualité des données d'entrée. L'objectif de ce dernier chapitre est d'élaborer deux cartes de susceptibilité aux glissements de terrain pour la zone d'étude.

La figure 54 illustre notre démarche pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la zone étudiée.

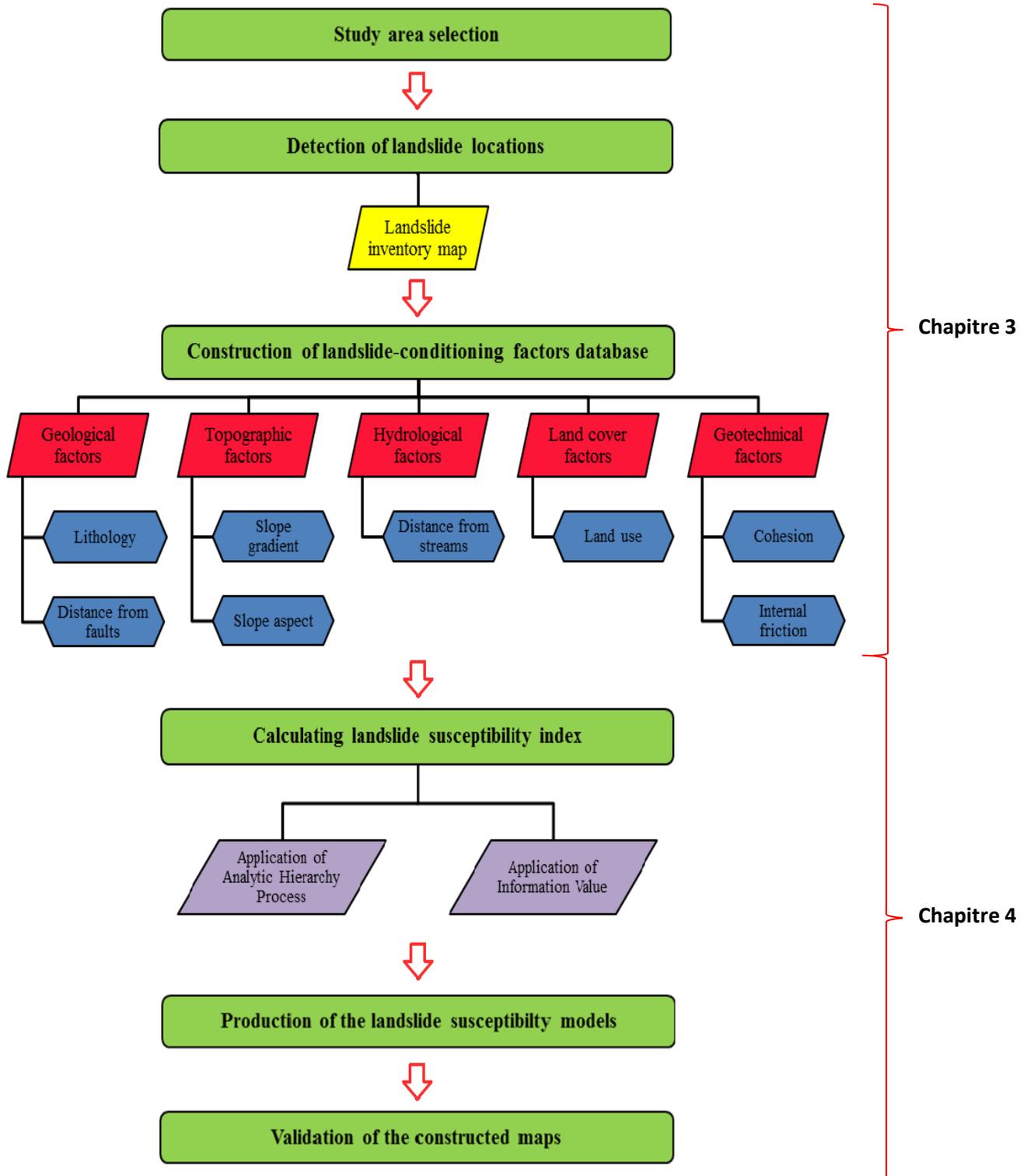


Figure 54. Organigramme montrant la méthodologie globale appliquée dans cette étude (d'après : Achour et al., 2017)

2. Application de la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (Analytic Hierarchy Process, AHP)

2.1. Méthodologie

Le système multicritères est une procédure heuristique conçue pour résoudre des problèmes décisionnels complexes (Saaty, 1990). Le principe général est basé sur la combinaison de la pondération relative de plusieurs jeux de variables explicatives. Le résultat final est exprimé sous forme de scores, correspondant à l'importance relative de chacun des facteurs analysés (Saaty, 1980 ; Saaty & Vargas, 2001).

Pour la cartographie de la susceptibilité, deux niveaux de pondération sont utilisés (Fig.55) :

- Les classes de variables se voient en premier lieu attribuer un poids respectif, correspondant à leur importance estimée dans le processus de glissement de terrain ;
- Les variables sont ensuite pondérées entre elles sur la base du même principe.

L'intégration de ces pondérations estimées vers la carte d'index de susceptibilité finale est déterminée par leurs sommes linéaires pondérées (équation.2) (Nijkamp et Voogd, 1983) :

$$S = \sum w_j \times x_{ij} \dots\dots\dots [Eq.2]$$

Où S est la carte d'index de susceptibilité finale, w_j est le poids attribué à la variable j et x_{ij} est le poids attribué à la classe i de variable j.

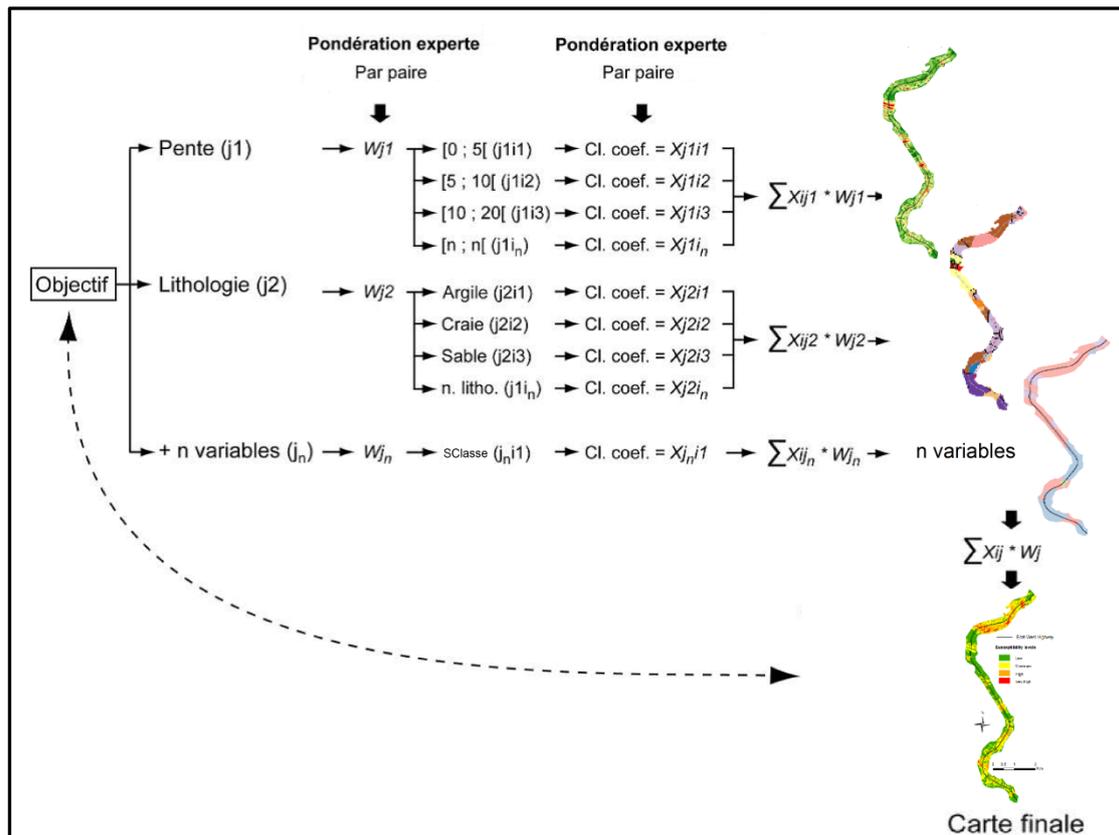


Figure 55. Principe de fonctionnement de l'AHP (modifiée, d'après Castellanos Abella, 2008)

La pondération relative des différentes variables peut être réalisée selon trois méthodes distinctes :

(1) **La méthode directe** (direct weighting), dans laquelle les poids respectifs sont directement attribués par l'utilisateur pour chaque variable et chaque classe de variable ;

(2) **La méthode de combinaison par paire** (pairwise weighting), où la pondération est effectuée de manière comparative suivant chaque combinaison binomiale possible (Saaty, 1980) ;

(3) **La méthode hiérarchisée** (rank order weighting) dans laquelle l'utilisateur propose une hiérarchie des différents facteurs, dont les pondérations relatives normalisées seront tirées (Saaty, 1980).

La carte finale pondérés peut ensuite être discrétisée afin d'obtenir la carte de susceptibilité finale.

2.2. Carte de susceptibilité des terrains de la zone d'étude

La cartographie par méthodes semi-quantitatives, constitue la première approche développée dans le cadre de cette recherche pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain. Elle vise à établir une classification/pondération des différents facteurs selon des systèmes experts (qualitatifs) dont les principes généraux ont été évoqués dans le chapitre 1.

Concernant les données nécessaires à la cartographie, le chapitre 3 a été l'occasion d'une présentation détaillée des différentes ressources cartographiques disponibles concernant les glissements de terrain dans le secteur d'étude. Ces données sont compilées sous SIG pour l'harmonisation des formats de stockage, permettant l'implémentation dans le modèle. Chaque variable est ainsi transformée en raster.

La démarche méthodologique pour la cartographie de la susceptibilité via la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP) est présentée dans la figure 56.

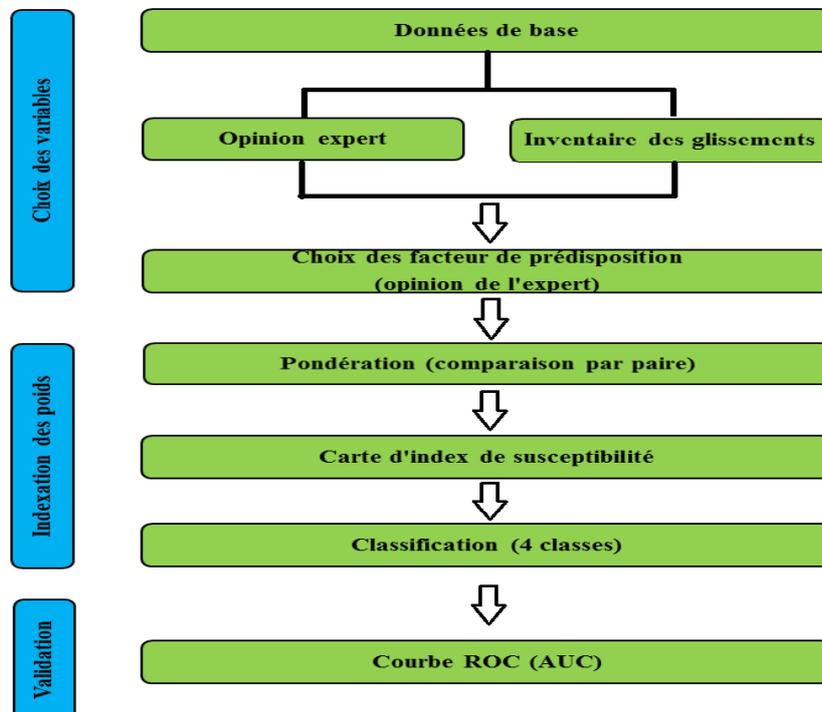


Figure 56. Procédure d'évaluation de la susceptibilité par l'AHP dans le secteur d'étude

L'attribution des poids est réalisée par la méthode de la combinaison par paire, permettant une meilleure objectivité de la pondération et ainsi limiter le nombre d'itérations de la procédure (Castellanos Abella, 2008).

La carte résultante de la pondération des différentes variables est représentée suivant une couche raster de données continues, exprimant la probabilité relative estimée par pixel de l'occurrence spatiale d'un ou plusieurs glissements de terrain. Il est ainsi nécessaire de discrétiser cette série continue afin de permettre une meilleure lisibilité de la carte dans un but opérationnel, notamment pour des non spécialistes. En fonction des méthodes de discrétisation sélectionnées, les résultats peuvent être extrêmement variables. Dans ce contexte, la méthode de discrétisation sélectionnée revêt donc une importance majeure (Ayalew et Yamagishi, 2005).

Les logiciels de SIG proposent ainsi une large gamme de méthodes de classification des séries continues. Celles-ci peuvent être définies manuellement par l'utilisateur, ou être réalisées automatiquement par l'intermédiaire de méthodes dirigées par les données. À titre d'exemple, il est possible de citer la célèbre méthode de classification de Jenks, utilisée dans cette étude, dont le résultat tend à maximiser les différences inter-classes et ainsi maximiser l'homogénéité intra-classe (De Smith et al., 2007). L'intervalle géométrique constitue une autre méthode automatique couramment employée dans la discrétisation des données spatialisées. Celle-ci est basée sur la géométrie de la distribution de la série, cherchant à homogénéiser le nombre d'individus intra-classe, tout en intégrant la variabilité de la distribution, notamment pour les valeurs extrêmes (De Smith et al., 2007).

L'évaluation de la qualité des résultats constitue une étape indispensable à toute démarche de cartographie de la susceptibilité (Chung & Fabbri, 2003). Elle doit suivre un protocole rigoureux et adapté à la méthode de cartographie afin de sélectionner les résultats les plus robustes.

Pour cette recherche, la carte produite par l'AHP a été évaluée suivant un test de qualité reposant sur des approches quantitatives. La courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) constitue une analyse de la qualité purement quantitative, basée sur la

distribution des scores bruts de la carte simulée et leurs relations avec les glissements de terrain. Cette technique a l'avantage d'être totalement indépendante de la classification et donne ainsi une évaluation plus objective des performances de la carte simulée (Lasko et al., 2005). Plus la courbe est au-dessus d'une ligne diagonale (forte croissance, puis tend vers l'asymptote), plus le modèle est considéré comme performant. L'AUC (Area Under the Curve) constitue un indicateur chiffré synthétique de cette courbe, mesurant la surface située sous celle-ci. Plus la valeur de l'AUC est proche de 1, plus le modèle est considéré comme performant. À l'inverse, un modèle de performance nulle montrera des valeurs d'AUC proches de 0.5.

2.3. Résultats et discussions

Des valeurs allant de 9 (extrêmement) à 1 (également) et 1/9 (l'opposé de l'extrême) sont attribuées par jugement d'un expert pour chaque couple de paramètres donnant une matrice carrée comme indiqué dans le tableau 7.

Tableau 7. Matrice de comparaison par paire des différents facteurs utilisés

Facteurs de prédisposition	Matrice de comparaison								Poids
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	
[1] Proximité aux failles	1								0,0720
[2] Proximité au réseau hydrographique	1/4	1							0,0254
[3] Pente	4	7	1						0,3071
[4] Exposition des versants	1	4	1/4	1					0,0720
[5] Lithologie	3	6	1/2	3	1				0,2031
[6] Occupation du sol	1	4	1/4	1	1/3	1			0,0720
[7] Cohésion	2	5	1/3	2	1/2	2	1		0,1242
[8] Angle de frottement interne	2	5	1/3	2	1/2	2	1	1	0,1242
Ratio de Cohérence = 0,014									

Le tableau 7 donne les poids relatifs pour chaque facteur de prédisposition. Ces poids ont été obtenus à partir de la matrice de comparaison par paire. Les valeurs obtenues indiquent que la pente est le paramètre le plus important avec une valeur de 0,3071, suivi par la lithologie, l'angle de frottement interne et la cohésion avec,

0,2031, 0,1224 et 0,1224, respectivement. Alors que la proximité aux failles, l'exposition des versants, l'occupation du sol et la proximité au réseau hydrographique sont moins importantes. Dans cette étude, le ratio de cohérence (CR) est de 0,014; cette valeur indique un degré de cohérence approprié, adéquat pour accorder le poids de chaque facteur.

L'intégration des différents facteurs dans une seule carte d'index de susceptibilité aux glissements de terrain est donnée par une procédure basée sur la somme linéaire pondérée (équation.3).

$$\begin{aligned} \text{LSI}_{\text{AHP}} = & 0.0720 \times \text{proximité aux failles} + 0.0254 \times \text{proximité au réseau hydrographique} \\ & + 0.3071 \times \text{pente} + 0.0720 \times \text{exposition des versants} + 0.2031 \times \text{lithologie} \\ & + 0.0720 \times \text{occupation du sol} + 0.1242 \times \text{cohésion} \\ & + 0.1242 \times \text{angle de frottement interne} \dots \dots \dots \text{ [Eq.3]} \end{aligned}$$

La carte de susceptibilité aux glissements de terrain générée par la méthode AHP est montrée dans la figure 57. Elle a été reclassée en quatre zones de susceptibilité: faible, modérée, élevée et très élevée selon la méthode de classification de Jenks (Pourghasemi et al., 2012). Selon cette figure, la susceptibilité est très élevée dans la partie extrême nord de la zone d'étude. Cette zone est principalement représentée par des terrains agricoles. Les zones à susceptibilité modérées sont largement répandues dans la partie sud et à l'extrême nord de la zone d'étude. La susceptibilité aux glissements de terrain est faible, principalement pour les zones situées dans le centre et dans le sud de la zone d'étude.

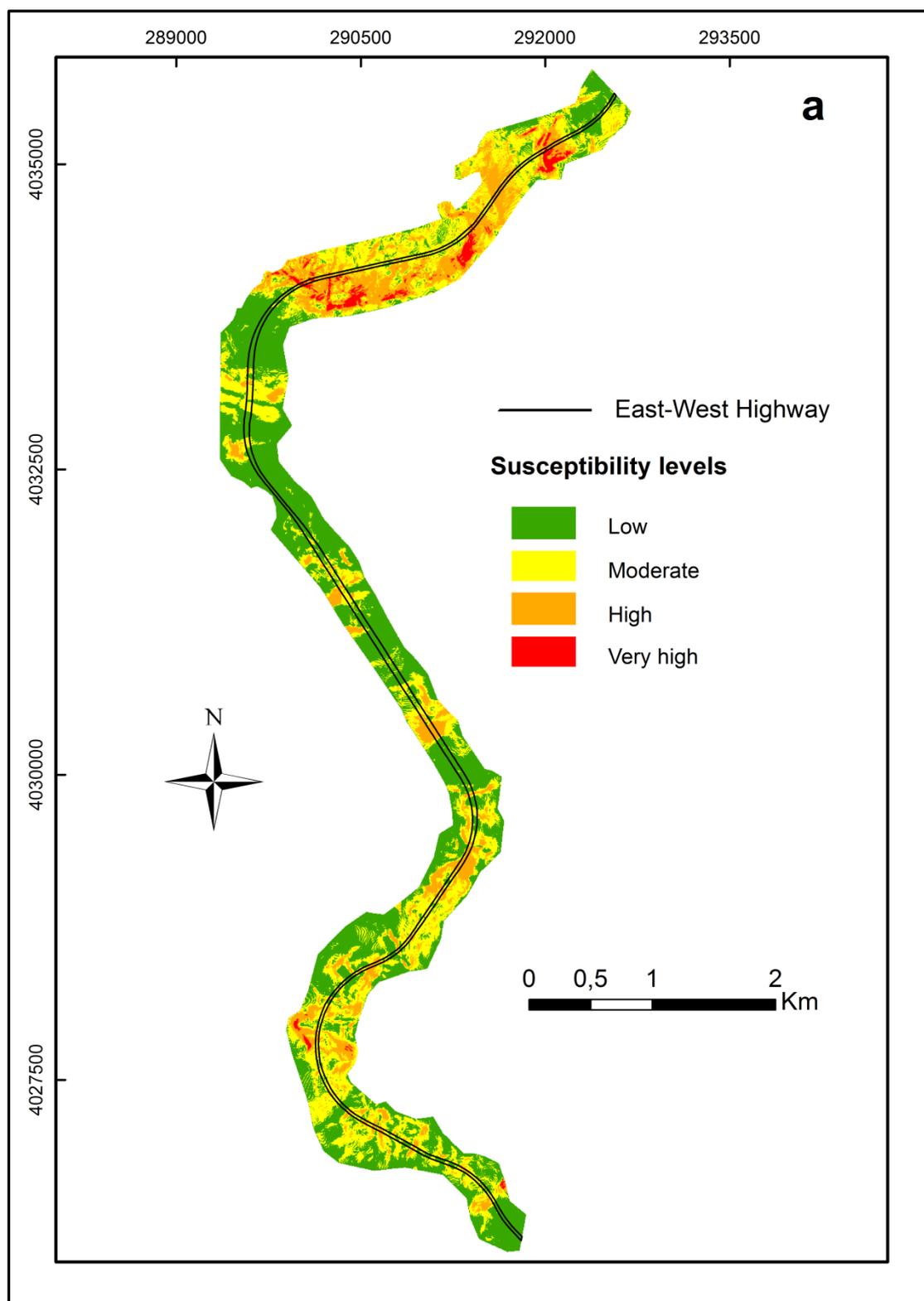


Figure 57. Carte de susceptibilité de la zone d'étude obtenue par AHP (d'après : Achour et al., 2017)

Le tableau 8 présente les densités des glissements de terrain pour les différentes zones de susceptibilité de la zone d'étude.

Tableau 8. Densités des glissements de terrain pour les différentes zones de susceptibilité (AHP)

Methode	Classes de Susceptibilité	Surface		Surface glissée		Densité des glissements
		(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)	
AHP	Faible	2.578	44	0.008	14	0.0032
	Modérée	2.025	35	0.028	49	0.0140
	Elevée	1.055	18	0.019	33	0.0181
	Très élevée	0.173	3	0.003	4	0.0158

A partir du tableau 8, on constate que 44% de la surface totale est de faible susceptibilité aux glissements de terrain. La zone de susceptibilité modérée représente 35% de la superficie totale. Les zones de susceptibilité élevée et très élevée représentent 18% et 3%, respectivement, de la surface totale de la zone d'étude.

2.3.1. Evaluation de la robustesse du modèle

Comme il a été signalé au paragraphe 2.2, la validation a été effectuée par la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) dans XLSTAT-Pro 7.5. Elle est évaluée grâce à la méthode de taux de réussite. Pour la carte de susceptibilité des glissements créée par l'AHP, la courbe ROC présente un profil convexe largement individualisé de la ligne diagonale (Fig.58). La valeur de l'AUC est de 0.66, pouvant être considérée comme un résultat acceptable suivant la classification proposée par Metz (1978).

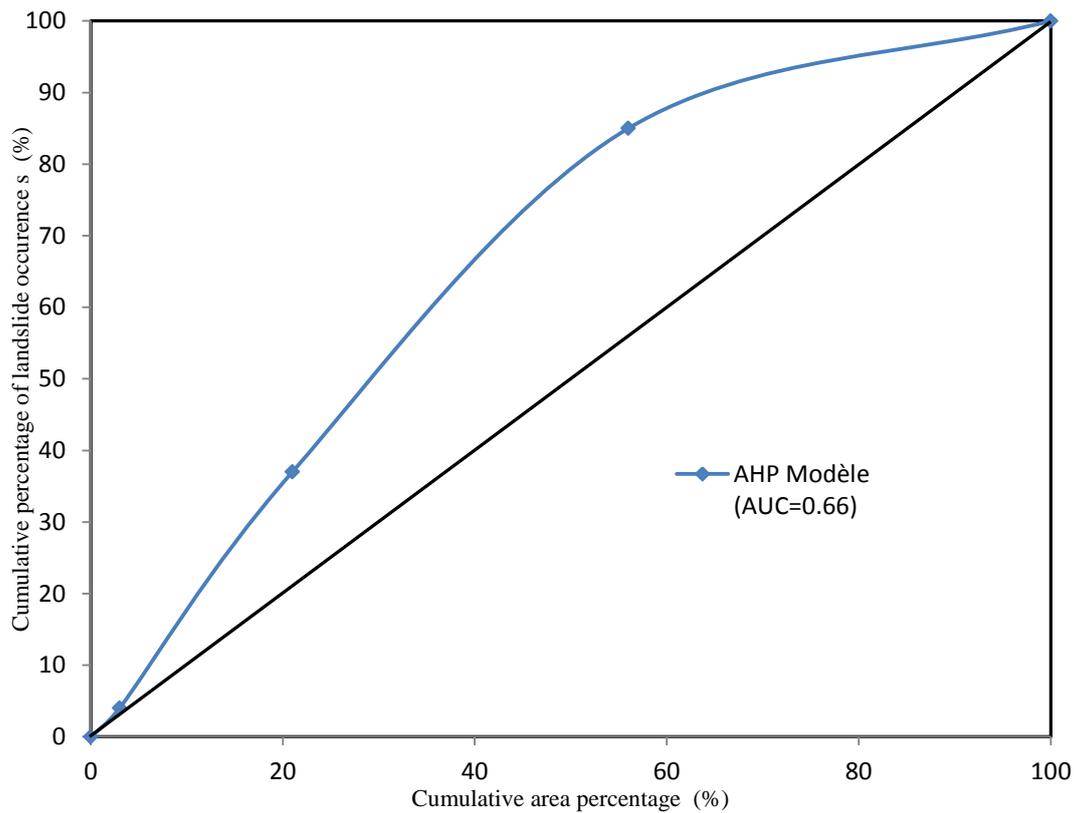


Figure 58. Taux de réussite du modèle construit par AHP. (D'après Achour et al ; 2017)

3. Application de la méthode de Pondération de l'Information (*Information Value method, IV*)

3.1. Méthodologie

C'est l'une des méthodes statistiques les plus connues. Elle est plus objective et plus facilement reproductible qu'une approche heuristique dont la qualité des résultats dépend de l'expérience de l'expert. De plus, elle est applicable à l'échelle régionale. Son principe est le suivant :

Une fois les glissements de la zone étudiée localisés, il faut relever les facteurs de prédispositions des terrains qui ont glissé. Ce sont les variables utiles à la construction de la carte de susceptibilité (Chapitre 3).

Au sein de chaque variable, les valeurs ayant les mêmes caractéristiques sont

regroupées pour former une classe. Puis une valeur informative est attribuée à chacune des classes de chaque variable. C'est cette valeur qui sert d'indicateur pour quantifier la susceptibilité de la classe. Elle est calculée de la manière suivante (équation.4) :

$$VI_{\text{classe } i} = \ln \left(\frac{S_i / N_i}{S / N} \right) \dots\dots\dots [\text{Eq.4}]$$

Avec :

- Si = la surface de la classe i qui a glissé ;
- Ni = la surface de la classe i ;
- S = la surface totale qui a glissé ;
- N = la surface totale de la zone étudiée.

Lorsque la valeur de $VI_{\text{classe } i}$ est positive, la probabilité d'occurrence de glissements de terrain est grande. Cela signifie que la probabilité de déclenchement d'un glissement de terrain augmente au fur et à mesure que la valeur informative augmente.

En représentation raster, chaque pixel de chaque thème possède une valeur informative. La carte de susceptibilité est alors obtenue par la somme des valeurs informatives de chaque thème présent dans chaque pixel. Ses valeurs sont également regroupées en classes (Fig.59).

Puis, la justesse de ce modèle est évaluée grâce à la détermination des taux de réussite (Yin et Yan, 1988 ; Chung et Fabbri, 2003). Le taux de réussite donne une idée de la robustesse du modèle en utilisant les glissements qui ont servi à construire le modèle de susceptibilité pour le valider. La courbe de réussite ainsi que l'aire sous la courbe ROC permettent d'évaluer la robustesse du modèle créé.

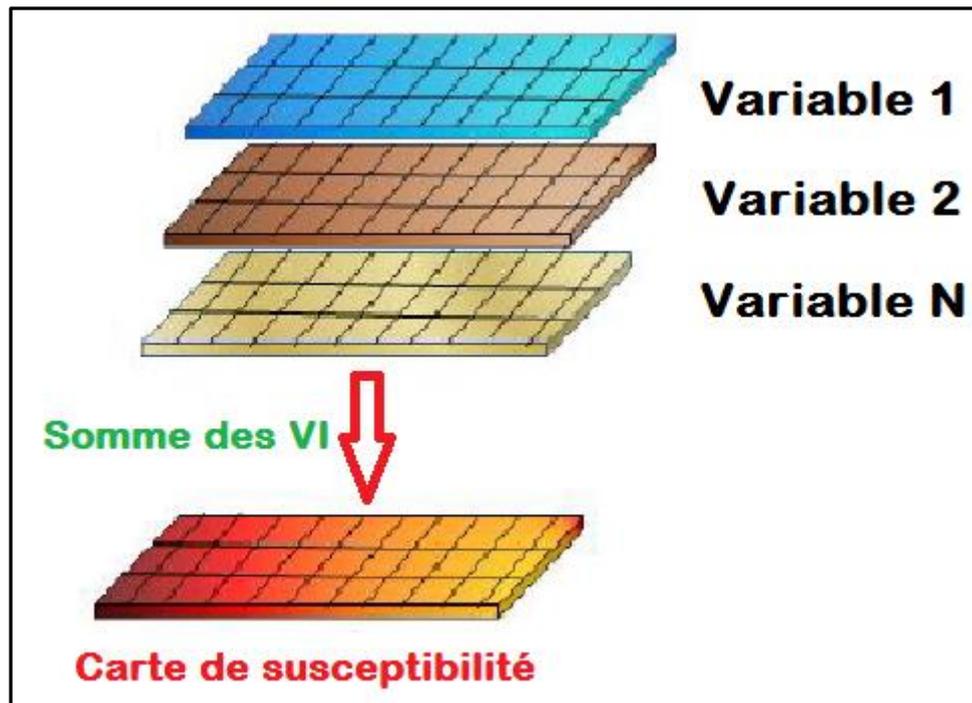


Figure 59. Principe de construction des cartes de susceptibilité par IV

3.2. Carte de susceptibilité des terrains de la zone d'étude

Dans cette étude, les valeurs informatives de chacune des classes de chacun des huit facteurs sont calculées à partir de l'équation (4). Au sein de chaque classe de chaque thème, la surface glissée correspond au nombre de pixels de cette classe contenant un glissement. Dans cette étude, les glissements sont représentés par des polygones. La surface qui a glissé correspond donc au nombre de pixels marqués dans ces polygones, ce qui est un modèle simplifié de la réalité. Pour connaître le véritable volume de terre déplacé par un glissement, il faut aller l'estimer sur le terrain.

Dans chaque pixel est calculée la valeur moyenne des valeurs informatives de chaque classe présente dans chaque facteur, et c'est cette valeur qui représente la susceptibilité. Cependant, il faut encore que la robustesse de ce modèle soit prouvée. Elle est évaluée grâce à la méthode de taux de réussite. Ce modèle donne de très bons résultats, comme on pourra le voir dans la validation.

3.3. Résultats et discussions

Pour effectuer la modélisation par cette méthode, chaque thème a été croisé avec la carte d'inventaire des glissements de terrain dans un environnement SIG (ArcGIS). Puis les valeurs informatives dans chaque classe ont été calculées. Les poids de chaque classe de chaque facteur sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9. Les valeurs informatives dans chaque classe des différents facteurs de prédisposition

Parameter	Si (m ²)	Ni (m ²)	Valeur Informative
Pente (°)			
0 – 5	775	1413400	-1,261
5 – 10	11800	2536900	-0,333
10 –15	28950	1286750	0,352
15– 25	16125	502775	0,506
> 25	700	90650	-0,113
Exposition des versants			
N	6175	1190025	-0,285
NE	875	327850	-0,574
E	175	168775	-0,985
SE	5450	318375	0,233
S	13300	614400	0,335
SW	7750	857850	-0,044
W	15200	994450	0,184
NW	9425	1358750	-0,159
Lithologie			
Eboulis récents (Quaternaire)	500	350675	-0,846
Terres arables (Quaternaire)	13850	1407075	-0,007
Glacis anciens à galets patinés (Salétien)	0	131475	0,000
Conglomérats et argiles sableuses (Mio-Pliocène)	8900	655450	0,133
Grès Numidiens	8200	1288900	-0,197
Marne et argile à grands blocs (Priabonien)	15100	904200	0,222

Calcaires clairs (Ypresien –Lutetien inférieur)	0	3525	0,000
Calcaires à silex (Ypresien – Lutetien inférieur)	0	46600	0,000
Marnes noires à boules jaunes (Maestrichtien - paléocène)	10525	675525	0,192
Calcaire du Djbel Oum Settas (Cénomanién)	625	132425	-0,326
Calcaire à Miliolidés, Orbitholines (Aptien)	0	156675	0,000
Calcaire dolomitique (Barrémien)	650	77950	-0,079
Proximité aux failles (m)			
0 – 50	15850	1202525	0,112
50 – 150	26100	1455550	0,253
150 – 250	5925	917575	-0,190
250 – 550	6850	1577800	-0,363
550 – 850	1175	422500	-0,556
>850	2450	254525	-0,017
Occupation du sol			
bâti	675	103000	-0,184
sols dénudés	32825	3551100	-0,034
culture	24850	2176375	0,057
Proximité au réseau hydrographique (m)			
0 – 50	30525	1875150	0,211
50 – 100	19575	1449625	0,130
100 – 150	6275	1012250	-0,208
150 – 200	1350	637575	-0,675
> 200	625	855875	-1,137
Angle de frottement interne (°)			
< 15	16250	1167025	0,143
15 – 25	33500	3124375	0,030
25 – 35	8500	1527025	-0,255
35 – 45	100	12050	-0,081
Cohésion (kPa)			
< 100	32600	2501325	0,115

100 – 200	25000	2138475	0,067
200 – 300	625	850925	-1,134
300 – 400	125	339750	-1,435
N = 5830475 m ² ; S = 58350 m ²			

D'après le tableau 9, les valeurs informatives obtenues augmentent progressivement avec l'augmentation de la pente, jusqu'à atteindre la classe de 15 à 25°. Après ces degrés de pente, les valeurs informatives diminuent. La classe de 15 à 25° a la valeur informative la plus élevée (0,506) suivie par la classe de 10 à 15° (0,352). La valeur la plus basse a été enregistrée pour la classe de pente 0 - 5° (-1,261), ce qui est logique. À partir de ces observations, il est clair que la probabilité d'occurrence de glissements de terrain est élevée dans les zones où l'angle de pente est compris entre 15 et 25°. Dans le cas de l'exposition des versants, la plupart des glissements de terrain se produisent dans les versants orientés vers le Sud (VI = 0,335), Sud-Est (VI= 0,233) et Ouest (VI = 0,184). Les pentes orientées vers l'Est sont moins sensibles aux glissements de terrain car elles ont la plus basse valeur.

Concernant la lithologie, les formations les plus susceptibles aux glissements de terrain sont : Conglomérats et argiles sableuses (Mio-Pliocène), Marnes noires à boules jaunes (Maestrichtien - paléocène) et Marne et argile à grands blocs (Priabonien) avec des valeurs informatives positives (0,133, 0,192 et 0,222, respectivement).

La proximité aux failles indique que la valeur la plus élevée (0,253) est enregistrée pour des distances de 50 à 150 m des failles. Dans le cas de l'occupation du sol, seule la classe de terres agricoles qui a une valeur positive de 0,057.

La proximité au réseau hydrographique donne une valeur informative de 0,211 pour des distances inférieures à 50 m et 0,130 pour des distances entre 50 à 100 m. Ces deux valeurs montrent clairement que les glissements de terrain sont plus susceptibles de se produire sous l'influence des cours d'eau distants de moins de 100 m.

Pour les paramètres géotechniques (cohésion et angle de frottement interne), les valeurs informatives obtenues ont montré une augmentation systématique en cas de

diminution des deux paramètres. Les valeurs les plus élevées ont été notées pour la classe $< 15^\circ$ (0.143) et < 100 kPa (0.115), respectivement, pour l'angle de frottement interne et la cohésion. Ces résultats montrent que les glissements de terrain sont plus susceptibles de se produire dans les sols et roches de mauvaises propriétés géotechniques.

Enfin, tous les poids de chaque classe calculés avec cette méthode ont été analysés en additionnant l'information de la couche retenue pour produire la carte finale de susceptibilité aux glissements de terrain par l'équation suivante :

$$\begin{aligned} LSI_{IV} = & (VI \text{ pente}) + (VI \text{ exposition des versants}) + (VI \text{ lithologie}) + (VI \text{ proximité au failles}) \\ & + (VI \text{ occupation du sol}) + (VI \text{ proximité au réseau hydrographique}) \\ & + (VI \text{ angle de frottement interne}) \\ & + (VI \text{ cohésion}) \dots\dots\dots [Eq.5] \end{aligned}$$

La carte de susceptibilité produite à partir de la méthode de la pondération de l'information (Fig.60) a été subdivisée en quatre classes (très élevée, élevée, modérée et faible) en utilisant la méthode de Jenks (Pourghasemi et al., 2012). Les valeurs d'index définitives calculées dans la zone d'étude sont comprises de -5,2573 à 1,8045. Soit la classe 1 celle qui comprend les valeurs informatives les plus faibles (entre -5,257 et -2,377), la classe 2 celle qui contient les valeurs informatives comprises entre -2,376 et -1,214, la classe 3 celle où elles prennent les valeurs entre -1,213 et 0,161 et la classe 4 celle regroupant les valeurs maximales (entre 0,160 et 1,804).

Les zones de susceptibilité très élevées sont principalement localisées dans la partie Nord et dans le Sud de la zone d'étude. Les zones de susceptibilité moyenne ont presque la même répartition que pour les zones de susceptibilité très élevées. La susceptibilité aux glissements de terrain est faible dans le Centre-Nord de la zone d'étude.

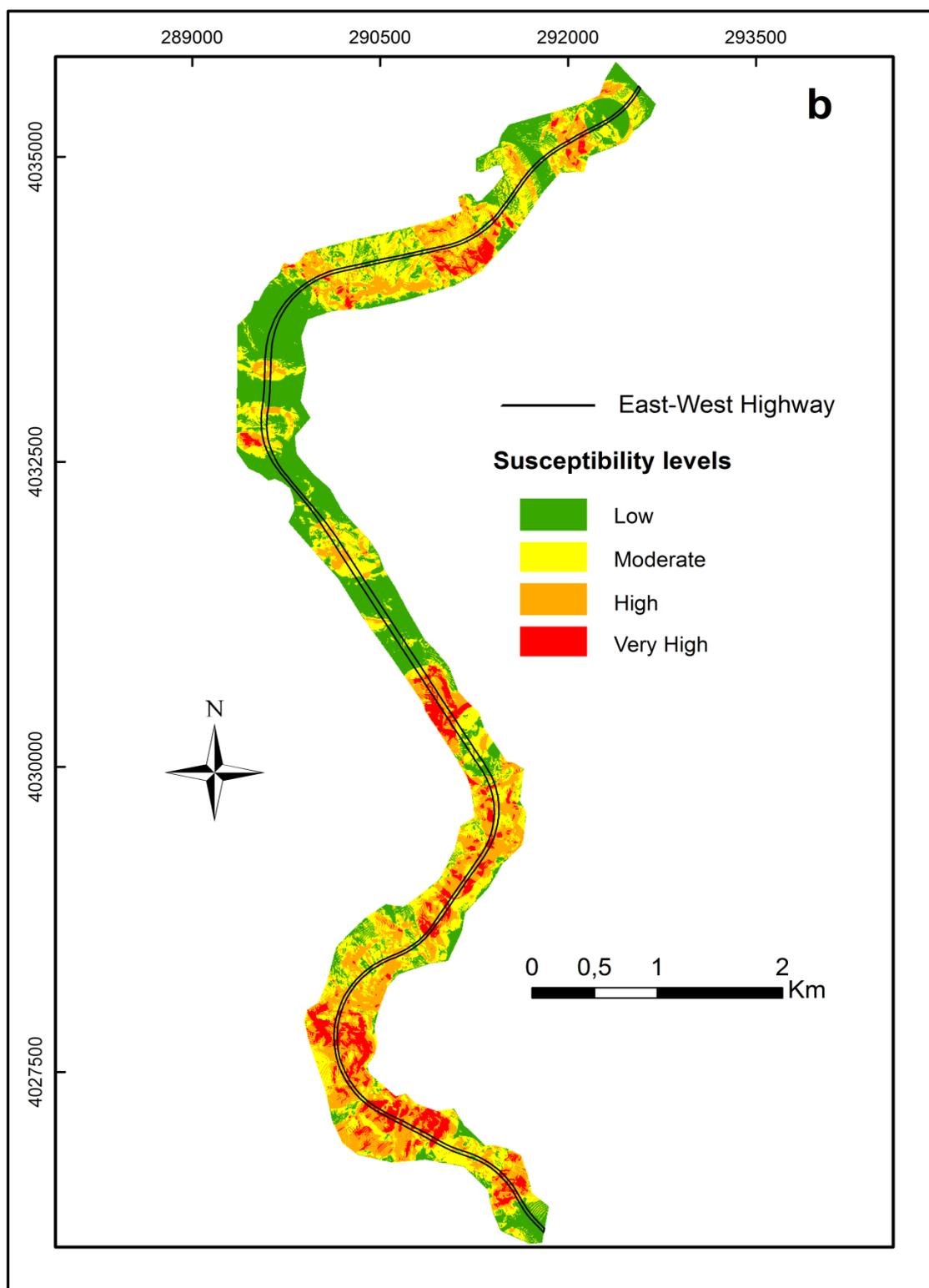


Figure 60. Carte de susceptibilité de la zone d'étude obtenue par IV. (D'après Achour et al ; 2017)

Le tableau 10 regroupe les résultats des densités des glissements de terrain pour les différentes zones de susceptibilité dans la zone d'étude.

Tableau 10. Densité des glissements de terrain pour les différentes zones de susceptibilité (IV)

Methode	Classes de Susceptibilité	Surface		Surface glissée		Densité des glissements
		(Km ²)	(%)	(Km ²)	(%)	
IV	Faible	2,225	38	0,003	4	0,0012
	Modérée	1,716	29	0,013	23	0,0078
	Elevée	1,358	23	0,017	30	0,0127
	Très élevée	0,531	10	0,025	43	0,0471

À partir du tableau 10, on constate que 38% de la superficie totale est désignée comme étant de faible susceptibilité aux glissements de terrain. Les classes de susceptibilité modérée et élevée constituent, respectivement, 29% et 23% de la superficie totale, tandis que le pourcentage de la classe très élevée est de 10%. La densité de glissement pour cette dernière est de 0.0471, ce qui est nettement plus grand comparativement aux autres classes. Tandis que, la densité dans les classes élevé, modéré et faible est de 0,0127, 0,0078 et 0,0012, respectivement. Ces résultats montrent qu'il y a une diminution progressive de la densité des glissements de terrain de la classe très élevée à la classe faible. Il existe également un écart considérable entre les valeurs de densité des différentes zones de susceptibilité. Par conséquent, on peut conclure que les zones de susceptibilité classées se trouvent en accord avec les glissements de terrain inventoriés (Kayastha et al., 2013).

3.3.1. Evaluation de la robustesse du modèle

Comme expliqué dans le paragraphe 3.1, le modèle qui a servi à l'élaboration de la carte de susceptibilité a été validé grâce à la courbe de réussite qui juge la robustesse de ce modèle (Fig.61).

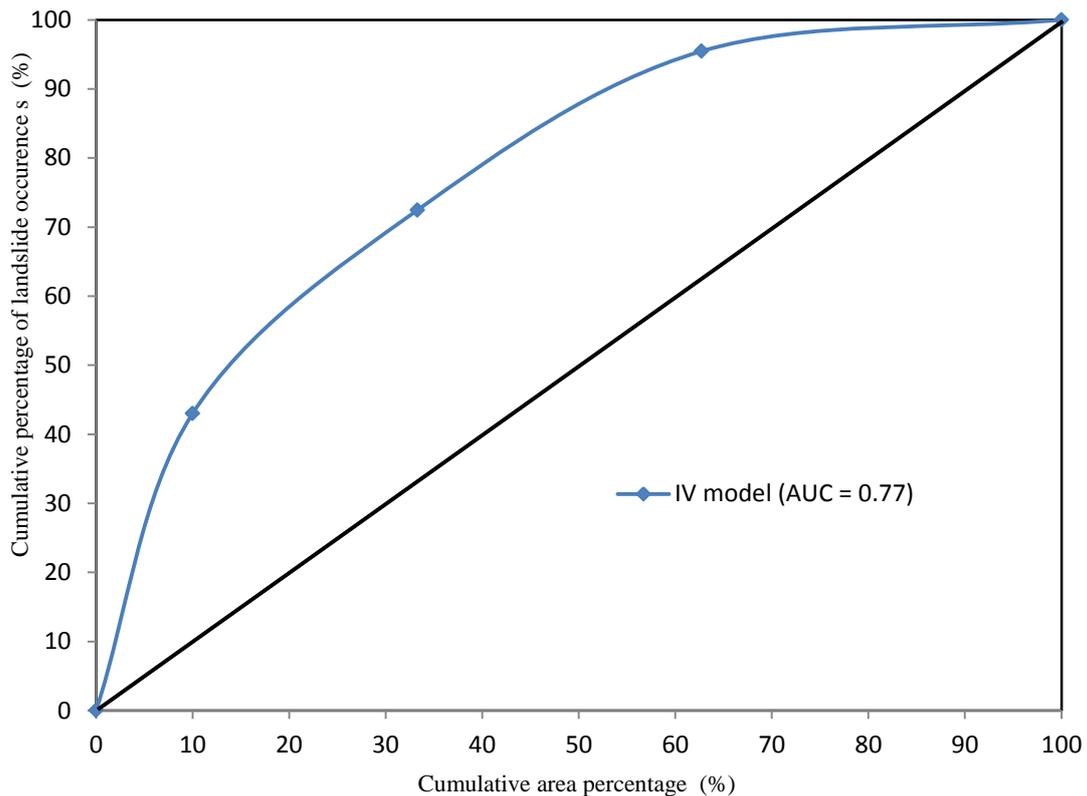


Figure 61. Taux de réussite du modèle construit par IV. (D'après Achour et al ; 2017)

La valeur « AUC » inscrite sur la figure 61 est une valeur sans unité qui donne une idée sur la robustesse du modèle ; plus sa valeur est importante, plus le modèle est robuste. Sa valeur de 0.77, pouvant être considérée comme un résultat acceptable suivant la classification proposée par Metz (1978).

Les constatations suivantes peuvent être tirées à partir de la courbe de réussite ci-dessus. On remarque que la valeur 10 en abscisse correspond à la valeur 43 en ordonnée, cela signifie que : ce sont dans les 10 % de la surface totale de la zone d'étude, déterminés par le modèle comme étant la zone de susceptibilité la plus élevée, que sont placés 43 % des glissements inventoriés. De même, on peut

affirmer que 73 % des glissements localisés sur le terrain se situent dans les 33 % des terrains les plus susceptibles. Le modèle est donc très robuste, les surfaces ayant été déterminées comme étant susceptibles par la méthode IV sont vraiment celles qui regroupent le plus de glissement. Suite à l'hypothèse affirmant que les prochains glissements auront plus de chances d'avoir lieu dans les mêmes conditions que les précédents, c'est aussi dans ces 33 % de la zone que devraient avoir lieu les 73 % des futurs glissements.

4. Comparaison entre les deux approches cartographiques

Les différentes approches sont maintenant évaluées. L'objectif final de la cartographie de la susceptibilité étant de retenir la meilleure approche, il convient de comparer les résultats acquis par l'approche semi-quantitative fondée sur l'Analyse Multicritère Hiérarchique et par l'approche probabiliste (Pondération de l'infirmité). Cette comparaison repose sur l'analyse des courbes de réussite et sur une comparaison experte (discussion de secteurs à problèmes).

Les premières comparaisons s'effectuent par l'analyse des courbes de réussite calculées à partir des deux approches.

La figure 62 présente les deux courbes de réussite obtenues pour les deux approches. La pondération de l'infirmité a un pouvoir prédictif supérieur comparativement avec l'analyse multicritères hiérarchique ($AUC_{IV} > AUC_{AHP}$). Ainsi, la différence entre les simulations par ces deux méthodes est clair d'après l'allure des courbes de réussite ; pour 33% de la surface la plus susceptible modélisée, la simulation par analyse multicritères hiérarchique prédit 56 % des glissements de terrain alors que pour la Pondération de l'infirmité 73% des glissements de terrain sont reconnus.

Les simulations réalisées par approche probabiliste bivariée sont supérieures en qualité de prédiction, à celles réalisées par approche semi-quantitative. Mais cette analyse statistique générale ne suffit pas. Il faut procéder à une analyse plus détaillée secteurs par secteurs en comparant ces résultats obtenus avec la réalité.

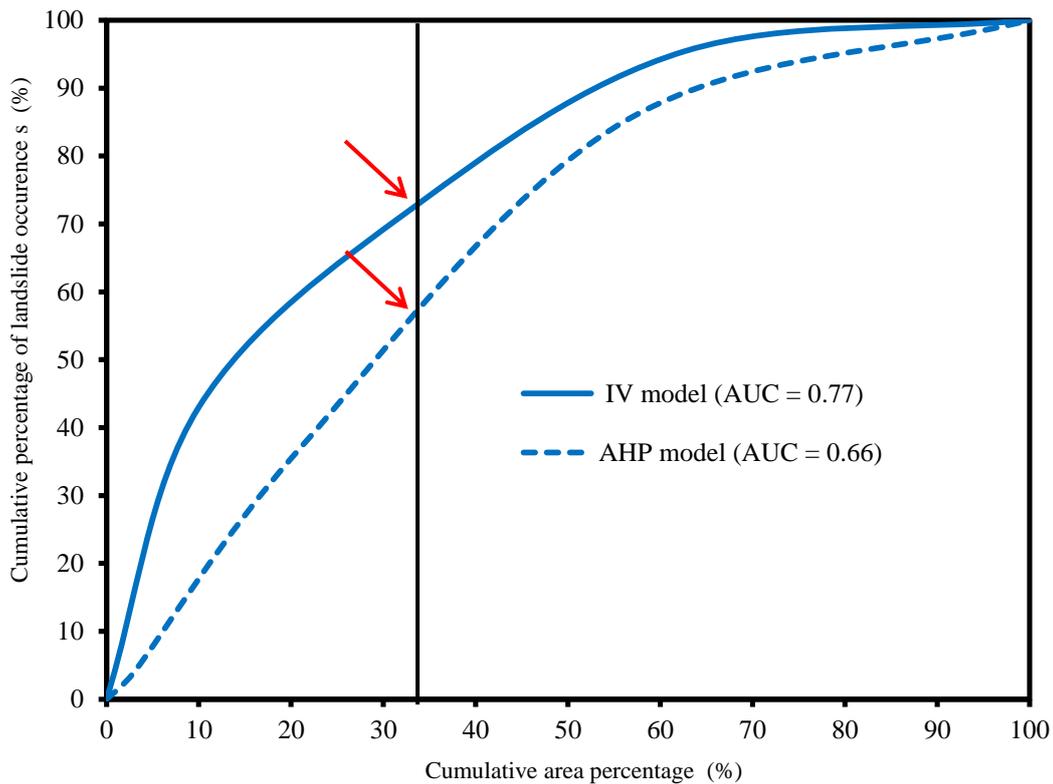


Figure 62. Comparaison statistique entre les courbes de réussites calculées à partir des deux approches

La phase de comparaison experte, comme nous l'avons indiqué au-dessus, est essentielle dans notre processus d'évaluation, en privilégiant le modèle qui fournit des résultats réalistes. C'est en ce sens que cette comparaison est jugée indispensable à cette échelle de travail, pour essayer de valider la meilleure approche à inclure dans une méthodologie de cartographie de la susceptibilité.

En comparant les deux cartes, il y a des endroits où les différences sont subtiles, et il y a aussi des zones avec des différences divergentes. Les deux cartes doivent donner des résultats similaires si elles sont classifiées de la même manière. Les deux cartes sont classifiées selon la même méthode de classification (Jenks) en quatre classes. Les différences entre ces deux cartes apparaissent principalement dans les zones montagneuses, telles que Djebel El Ouahch et Djebel Kellal et dans la zone Sud. Ces écarts diminuent progressivement dans la partie Nord du secteur étudié. La raison probable de cette différence est la nature subjective de la stratégie adoptée pour

sélectionner les scores appropriés qui relient la contribution d'un facteur à l'autre dans AHP.

La figure 63 présente les différences entre les zones de susceptibilité forte pour les cartes simulées (par l'Analyse Multicritères Hiérarchique et par Pondération de l'Infirmation) dans un site à problème (Tunnel 1 de Djebel El Ouahch). Des différences sont globalement présentes ; la carte construite via la méthode de pondération de l'infirmité donne une excellente cohérence avec les observations de terrain, en particulier l'emplacement du mouvement de masse qui s'est produit en janvier 2014 dans le tube gauche du tunnel 1 à Djebel El Ouahch, qui se trouve dans la zone à très forte susceptibilité. De ce fait, les simulations par pondération de l'infirmité apparaissent plus performantes pour obtenir des classes fortes en adéquation avec la réalité comparativement avec l'autre méthode.

Enfin, la différence modérée entre les deux cartes indique, que malgré un processus de calcul distinct, les stratégies élaborées pour ces deux approches sont comparables.

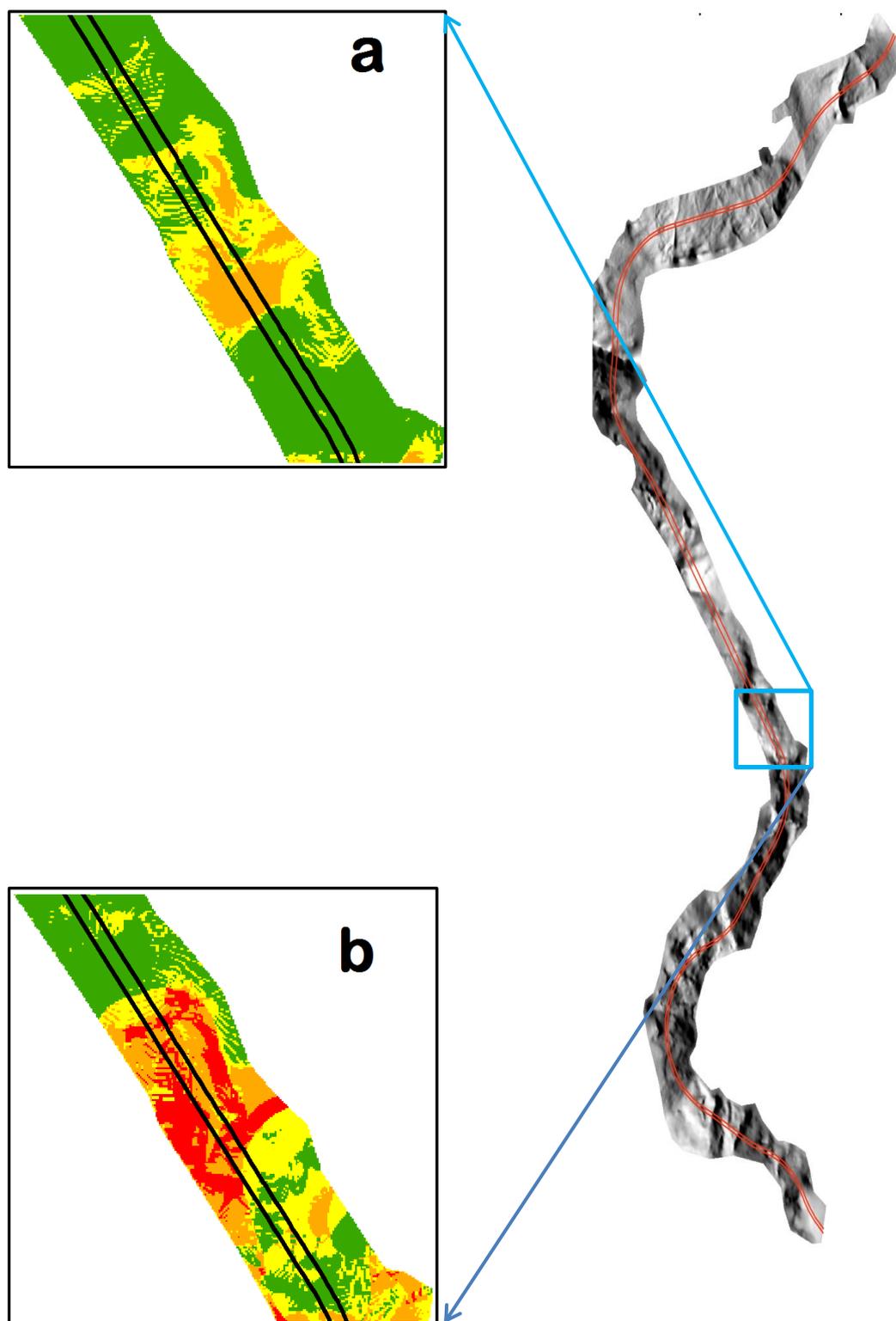


Figure 63. Comparaison experte des résultats des deux approches dans le secteur de Djebel El Ouahch:
a) AHP, b) IV

5. Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif d'analyser la susceptibilité des terrains aux glissements de versant par deux approches, au degré de subjectivité différent : l'approche semi-quantitative reposant sur l'Analyse Multicritère Hiérarchique et une approche probabiliste (Pondération de l'information), afin de déterminer le modèle le plus propice pour l'évaluation de la susceptibilité dans la zone d'étude.

Les résultats des deux modèles sont plus ou moins similaires. Les simulations par pondération de l'information apparaissent plus performantes et plus adaptées, à l'échelle de travail considérée, pour obtenir un bon modèle en adéquation avec la réalité comparativement avec l'autre méthode. La carte construite via la méthode de pondération de l'information donne une excellente cohérence avec les observations de terrain. En ce qui concerne la gestion du territoire, les décideurs peuvent, à partir de ce modèle et de la carte de susceptibilité qui en est issue, choisir de focaliser leurs efforts pour diminuer le risque sur la partie du territoire le plus susceptible. En interdisant par exemple la construction sur les zones du territoire les plus susceptibles, afin d'éviter les futurs glissements de créer des dommages dans le site d'étude.

Conclusion

Générale

CONCLUSION GENERALE

En raison d'une pression humaine toujours plus forte en régions montagneuses et des enjeux économiques de plus en plus importants, il est devenu indispensable d'améliorer nos connaissances sur la prévision des glissements de terrain à l'échelle locale.

Au moment de débiter cette thèse en 2012, nous nous étions fixés pour ambition d'effectuer une évaluation et une cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain au voisinage d'un tronçon de l'autoroute Est/Ouest à Constantine. Au terme de ce parcours, nous constatons que nous avons trouvé un certain nombre de réponses à notre questionnement initial.

Nous avons défini au commencement de la thèse trois grands objectifs de recherche :

- Tester les différents outils et techniques de la modélisation et d'apporter des éléments de réponse quant à l'évaluation et la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain au voisinage d'un tronçon de l'autoroute Est/Ouest à Constantine.
- Evaluer la contribution des différents facteurs de prédisposition des glissements de terrain.
- Contribuer à une meilleure connaissance de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la zone d'étude afin d'informer les administrations locales et les habitants sur les possibilités de glissement de terrain qui peuvent survenir.

Notre démarche a donc été conduite à échelle large ce qui était, et reste encore, assez rare pour une cartographie de la susceptibilité par SIG en Algérie. Cela a conduit à la construction de bases de données spécifiques, à la fois pour les glissements de terrain et pour les facteurs de prédisposition à prendre en compte.

Le **premier chapitre** consiste en un état de l'art des méthodologies de cartographie de la susceptibilité pour différentes échelles de travail. Ceci permet de cibler les approches de cartographie à utiliser. Pour l'analyse de la susceptibilité, deux approches sont donc choisies pour leur facilité de mise en place : une approche semi-

quantitative par Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP) et une approche probabiliste bivariée basée sur la Pondération de l'Information (IV).

Le **deuxième chapitre** décrit plus précisément les caractéristiques géographiques du secteur d'étude. Les conditions météo-climatiques, morphologiques et géologiques sont discutées en se fondant sur des données et études préexistantes et sur les cartes topographiques et géologiques. Les raisons pour lesquelles la région d'étude a été sélectionnée sont citées. Ainsi, L'analyse hydro-climatologique de la région d'étude nous a permis de constater qu'il y a une très grande variation des précipitations et des températures. Du point de vue géologique, les grands ensembles lithologiques du site d'étude sont représentés par des nappes de charriage où dominent les unités marneuses et marno-calcaires à la base, d'âge Crétacé. Ces unités sont recouvertes, dans la région du Djebel El Ouahch, par la nappe Numidienne (Oligocène - Miocène inférieur) formée par des grès grossiers, massifs, au sommet et des argiles à la base. Des colluvions épaisses, de plusieurs dizaines de mètres, grossières, à blocs gréseux et à matrice sableuse, d'âge Quaternaire, recouvrent largement les formations allochtones.

Le **troisième chapitre** présente les différentes variables : variable à modéliser (glissements de terrain), variables prédictives (facteurs de prédisposition). Ces derniers ont été choisis en fonction de trois critères essentiels : la pertinence, la disponibilité et l'échelle. L'inventaire a permis d'enrichir, d'illustrer et de valider les glissements de terrain par l'observation de quelques cas similaires. Dans cette étude, l'inventaire des glissements de terrain a été réalisé suivant trois méthodes de cartographie :

- Collecte des données d'archives (Agence nationale des autoroutes, ANA) ;
- L'interprétation de l'occurrence des glissements de terrain à partir d'images satellitaires ;
- Travail sur le terrain utilisant le GPS.

Au final, 29 glissements de terrain rotationnels ont été identifiés et cartographiés pour les différentes analyses spatiales. Les variables prédictives utilisées sont construites spécifiquement pour cette étude. Huit facteurs de prédisposition sont sélectionnés comme entrées pour les modèles de cartographie de la susceptibilité aux

glissements de terrain dans cette étude. Ces facteurs sont : la pente, l'exposition des versants, la lithologie, la proximité aux failles, la proximité au réseau hydrographique, l'occupation du sol, la cohésion et l'angle de frottement interne.

Dans le **quatrième chapitre**, deux méthodes de cartographie sont appliquées : une méthode semi-quantitative fondée sur l'Analyse Multicritère Hiérarchique et une méthode probabiliste (Pondération de l'information). Les deux ont été testées sur un site représentatif. Les différents tests proposés au cours de cette recherche sont bons à très bons. Ils ont montré que *la carte simulée par approche probabiliste bivariée est meilleure que celle simulée par approche semi-quantitative*, en terme de reconnaissance des phénomènes et des classes de susceptibilité identifiées de manière statistique et experte. Les approches semi-quantitatives restent extrêmement subjectives et souvent critiquées pour leur manque de reproductibilité. Cette considération ne remet pas en cause la capacité de l'expert à identifier des relations de cause à effet entre le phénomène et les facteurs de prédisposition mais, est plutôt orientée sur la difficulté de déterminer la contribution relative de chaque facteur dans le processus et par la même occasion d'en dériver des pondérations justes.

En ce qui concerne la gestion du territoire, les décideurs peuvent, à partir du modèle construit via la méthode probabiliste bivariée et de la carte de susceptibilité qui en est issue, choisir de focaliser leurs efforts pour diminuer le risque sur la partie du territoire le plus susceptible. En interdisant par exemple la construction sur les zones du territoire les plus susceptibles, afin d'éviter les futurs glissements de créer des dommages dans le site d'étude.

Toutefois, ces résultats sont exploratoires et nécessitent des améliorations notamment pour :

- L'évaluation des risques liés aux glissements de terrain afin d'estimer la période de retour et l'ampleur d'un événement futur. Cela pourrait être une tâche difficile car les données temporelles peuvent être inexistantes. Si on arrive à réaliser ça, une évaluation de la vulnérabilité pourrait également être appliquée pour pouvoir cartographier ces risques ;
- La prise en compte d'autres facteurs de prédisposition tels que par exemple : le niveau des nappes d'eaux souterraines ;

- La disposition de plus de moyens pour mettre à jour et améliorer les bases de données de glissements de terrain. Une étude précise des glissements de terrain anciens et récents, avec une caractérisation détaillée des caractéristiques de glissement et l'analyse des causes possibles et des mécanismes de déclenchement, est nécessaire pour les prochaines études ;
- L'établissement de nouveaux modèles via d'autres approches telles que : les réseaux de neurones, l'analyse discriminante, la régression multiple, la théorie de l'évidence...etc, afin d'affiner les cartes finales de susceptibilité ;
- La transposition de ces méthodologies de cartographie de la susceptibilité sur d'autres sites, afin de vérifier si les différentes étapes sont valables uniquement pour cette section ou bien, s'il est possible d'obtenir des résultats pour d'autres sections autoroutières similaires.

Références

Bibliographiques

A

- Abella, E. A. C., & Van Westen, C. J. (2008). Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. *Geomorphology*, 94(3), 453-466.
- Achour, Y., Boumezbeur, A., Hadji, R., Chouabbi, A., Cavaleiro, V., & Bendaoud, E. A. (2017). Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(8), 194.
- Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the environment*, 58(1), 21-44.
- Alexander, D. (2005). Vulnerability to landslides. *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester, 175-198.
- Alexander, C. (2009). Delineating tree crowns from airborne laser scanning point cloud data using Delaunay triangulation. *International Journal of Remote Sensing*, 30(14), 3843-3848.
- Aris, Y. (1994). Etude tectonique et microtectonique des séries jurassiques à plio-quadernaires du Constantinois central (Algérie nord-orientale). Caractérisation des différentes phases de déformation (Doctoral dissertation).
- Aubouin, J., & Durand-Delga, M. (1971). Aire méditerranéenne. *Encyclopaedia universalis*, 10, 743-745.
- Ayalew, L., & Yamagishi, H. (2005). The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1), 15-31.

B

- Barlow, J., Martin, Y., & Franklin, S. E. (2003). Detecting translational landslide scars using segmentation of Landsat ETM+ and DEM data in the northern Cascade Mountains, British Columbia. *Canadian journal of remote sensing*, 29(4), 510-517.

- Beguería, S. (2006). Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. *Natural Hazards*, 37(3), 315-329.
- Benabbas, C. (2006). *Évolution Mio-Plio-Quaternaire des bassins continentaux de l'Algérie nord orientale: apport de la photogéologie et analyse morpho structurale*. Mentouri, Constantine.
- Benhallou, H. (1985). *Les catastrophes sismiques de la région d'ech Chellif dans le contexte de la sismicité historique de l'Algérie du Nord* (Doctoral dissertation, Thèse doct. USTHB, Alger).
- Bonham-Carter, G. F. (1994). Geographic Information Systems for geoscientists-modeling with GIS. *Computer methods in the geoscientists*, 13, 398.
- Bouedja, F. (2010). *Tectonique actuelle et récente et risque sismique de la région de Constantine* (Mémoire de Magister. UFAS, Sétif).
- Bougdal, R., & Antoine, P. (2007). *Urbanisation et mouvements de versants dans le contexte géologique et géotechnique des bassins néogènes d'Algérie du Nord* (Doctoral dissertation).
- Bouillin, J. P. (1977). *Géologie alpine de la Petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El Milia (Algérie)* (Doctoral dissertation).
- Bozzano, F., De Pari, P., & Scarascia Mugnozza, G. (1996). Historical data in evaluating landslide hazard in some villages in Southern Italy. In *Proc. 7th Int. Symp. on Landslides, Trondheim* (Vol. 1, pp. 159-164).
- Brabb, E. E., & Pampeyan, E. H. (1972). *Preliminary map of landslide deposits in San Mateo County, California* (No. 344).
- Brabb, E. E. (1984). *Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping*.
- Brunsdon, D. (1985, April). *Landslide types, mechanisms, recognition, identification*. In *Landslides in the South Wales coalfield*, edited by: Morgan, CS, *Proceedings Symposium, April* (pp. 1-3).
- Bureau, D. (1970). *Principaux traits de la structure des monts du Belezma (Algérie)*. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(2), 210-213.

C

- Carrara, A., Catalano, E., Valvo, M. S., Reali, C., Merenda, L., & Rizzo, V. (1977). *Landslide morphometry and typology in two zones, Calabria, Italy*. *Bulletin of*

- the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 16(1), 8-13.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., & Reichenbach, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth surface processes and landforms*, 16(5), 427-445.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. In *Geographical information systems in assessing natural hazards* (pp. 135-175). Springer Netherlands.
- Carrara, A., Bitelli, G., & Carla, R. (1997). Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. *International Journal of Geographical Information Science*, 11(5), 451-473.
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. *Natural hazards*, 20(2-3), 117-135.
- Castellanos Abella, E. A. (2008). Local landslide risk assessment. Multi-scale landslide risk assessment in Cuba, edited by: Castellanos Abella, EA, Utrecht, Utrecht University, ITC Dissertation, 154, 193-226.
- Cevik, E., & Topal, T. (2003). GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental geology*, 44(8), 949-962.
- Chacón, J., Irigaray, C., Fernandez, T., & El Hamdouni, R. (2006). Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(4), 341-411.
- Chadi, M. (1991). Géologie structurale des monts d'Aïn M'Lila (Algérie orientale) (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat de l'Université de).
- Chandler, J. H., & Moore, R. (1989). Analytical photogrammetry: a method for monitoring slope instability. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 22(2), 97-110.
- Chandler, J. H., & Brunsten, D. (1995). Steady state behaviour of the Black Ven mudslide: the application of archival analytical photogrammetry to studies of landform change. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20(3), 255-275.
- Chang, K. T., & Tsai, B. W. (1991). The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping. *Cartography and geographic information systems*, 18(1), 69-77.

- Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédois, S., Silvera, N., & Phachomphon, K. (2006). Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology*, 77(1), 126-141.
- Chung, C. J. F., & Fabbri, A. G. (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30(3), 451-472.
- Coiffait, P. E. (1992). Un bassin post-nappes dans son cadre structural: l'exemple du bassin de Constantine (Algérie Nord-Orientale). Th. Doct. Etat Sci. nat., Nancy, 1, 405.
- Côte, M. (1998). Les régions bioclimatiques de l'est algérien.
- Crozier, M. J. (1986). *Landslides: causes, consequences & environment*. Taylor & Francis.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslides: investigation and mitigation*. Chapter 3-Landslide types and processes. Transportation research board special report, (247).
- Cuesta, M. J. D., Sánchez, M. J., & García, A. R. (1999). Press archives as temporal records of landslides in the North of Spain: relationships between rainfall and instability slope events. *Geomorphology*, 30(1), 125-132.

D

- Dai, F. C., & Lee, C. F. (2001). Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5), 911-923.
- Dai, F. C., & Lee, C. F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3), 213-228.
- Dai, F. C., Lee, C. F., & Ngai, Y. Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering geology*, 64(1), 65-87.
- Dangermond, J. (1983). Software components commonly used in geographic information systems. In 1983 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'83), San Francisco, CA.

- Das, I., Stein, A., Kerle, N., & Dadhwal, V. K. (2012). Landslide susceptibility mapping along road corridors in the Indian Himalayas using Bayesian logistic regression models. *Geomorphology*, 179, 116-125.
- Desmet, P. J. J., & Govers, G. (1996). Comparison of routing algorithms for digital elevation models and their implications for predicting ephemeral gullies. *International Journal of Geographical Information Science*, 10(3), 311-331.
- De Smith, M. J., Goodchild, M. F., & Longley, P. (2007). *Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. Troubador Publishing Ltd.
- Dewitte, O., Chung, C. J., & Demoulin, A. (2006). Reactivation hazard mapping for ancient landslides in West Belgium. *Natural Hazards and Earth System Science*, 6(4), 653-662.
- Dietrich, W. E., Reiss, R., Hsu, M. L., & Montgomery, D. R. (1995). A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological processes*, 9(3- 4), 383-400.
- Dikau, R. (1996). *Landslide recognition: identification, movement, and causes* (No. 1). Wiley.
- Durand-Delga, M. (1969). Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. *Publ. Serv. géol. Algérie*, 39, 89-131.
- Durand-Delga, M., & Fontboté, J. M. (1980). Le cadre structural de la Méditerranée occidentale. *Mem. BRGM*, 15, 677-685.

E

- Ercanoglu, M., & Gokceoglu, C. (2002). Assessment of landslide susceptibility for a landslide-prone area (north of Yenice, NW Turkey) by fuzzy approach. *Environmental geology*, 41(6), 720-730.
- Ercanoglu, M. (2005). Landslide susceptibility assessment of SE Bartın (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(6), 979-992.
- Ermini, L., Catani, F., & Casagli, N. (2005). Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment. *Geomorphology*, 66(1), 327-343.

F

- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102(3), 99-111.
- Flageollet, J. C. (1989). *Les mouvements de terrain et leur prévention* (Vol. 41). Masson.
- Flageollet, J. C., Maquaire, O., Martin, B., & Weber, D. (1999). Landslides and climatic conditions in the Barcelonnette and Vars basins (Southern French Alps, France). *Geomorphology*, 30(1), 65-78.
- Florinsky, I. V. (1998). Combined analysis of digital terrain models and remotely sensed data in landscape investigations. *Progress in Physical Geography*, 22(1), 33-60.
- Fookes, P. G., Dale, S. G., & Land, J. M. (1991). Some observations on a comparative aerial photography interpretation of a landslipped area. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 24(3), 249-265.

G

- Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2008). Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology*, 94(3), 268-289.
- Glade, T. (2001). Landslide hazard assessment and historical landslide data—an inseparable couple?. In *The use of historical data in natural hazard assessments* (pp. 153-168). Springer Netherlands.
- Glade, T. (2003). Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *Catena*, 51(3), 297-314.
- Glangeaud, L. (1951). Interprétation tectonophysique des caractères structuraux et paléogéographiques de la Méditerranée occidentale. *Bulletin de la Société géologique de France*, 6(1), 735-276.
- Gorsevski, P. V., Gessler, P. E., & Jankowski, P. (2003). Integrating a fuzzy k-means classification and a Bayesian approach for spatial prediction of landslide hazard. *Journal of geographical systems*, 5(3), 223-251.

- Guellal, S., Vila, J. M. (1973). Étude géologique du permis Aïn Beda. Rapport SONATRACH, 120 p.
- Guiraud, R. (1973). Evolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne Alpine de l'Algérie, d'après l'étude du bassin d'El Eulma et les régions voisines (Doctoral dissertation, Thesis, Sc. Nat. Nice, France).
- Guzzetti, F., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1994). The AVI Project: A bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy. *Environmental Management*, 18(4), 623-633.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1), 181-216.
- Guzzetti, F. (2000). Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy. *Engineering Geology*, 58(2), 89-107.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1), 272-299.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., & Galli, M. (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, 81(1), 166-184.
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1), 42-66.

H

- Hansen, A. (1984). *Landslide hazard analysis. Slope instability*. Wiley, New York, 523-602.
- Hée, A. (1950). Catalogue des séismes algériens de 1850 à 1911. *Ann. Inst. Phys. Globe*, Strasbourg, 6, 41-49.
- Helluin, E. (1987). Les mouvements de terrain de février 1988 dans le Calvados. Risques naturels et analyses pour une prévention. *L'hiver*, 1988, 8-10.
- Hengl, T. O. M. I. S. L. A. V., Heuvelink, G. B., & Stein, A. L. F. R. E. D. (2003). Comparison of kriging with external drift and regression-kriging. Technical note, ITC, 51.

- Honda, K., Phillipps, G. P., & Yokoyama, G. P. (2002). Identifying the threat of debris flow to major arterial roads using Landsat ETM+ imagery and GIS modeling—an example from Catanduanes island, Republic of the Philippines. In Proceedings of the Asian conference on remote sensing,
- Huabin, W., Gangjun, L., Weiya, X., & Gonghui, W. (2005). GIS-based landslide hazard assessment: an overview. *Progress in Physical Geography*, 29(4), 548-567.
- Hutchinson J. N. (1968). Mass movement. In R. W. Fairbridge (Ed.), *Encyclopedia of Geomorphology* (pp. 688-695). New York: Reinhold Publishers.
- Hutchinson, M. F. (1988, August). Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In Proceedings of the Third International Symposium on Spatial Data Handling (Vol. 133). Columbus, Ohio: International Geographical Union.
- Hutchinson, J. N. (1989, March). General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology: Proc 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 10–15 July 1988V1, P3–35. Publ Rotterdam: AA Balkema, 1988. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 26, No. 2, p. 88). Pergamon.
- Hutchinson, J. N., & Chandler, M. P. (1991). A preliminary landslide hazard zonation of the Undercliff of the Isle of Wight. In *Slope stability engineering developments and applications: Proceedings of the international conference on slope stability organized by the Institution of Civil Engineers and held on the Isle of Wight on 15–18 April 1991* (pp. 197-205). Thomas Telford Publishing.
- Hutchinson, M. F., & Dowling, T. I. (1991). A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. *Hydrological Processes*, 5(1), 45-58.
- Hutchinson, J., Whittle, J., Rouncefield, M., & Kristoffersen, S. (2011, May). Empirical assessment of MDE in industry. In *Software Engineering (ICSE), 2011 33rd International Conference on* (pp. 471-480).

J

Jakob, M. (2000). The impacts of logging on landslide activity at Clayoquot Sound, British Columbia. *Catena*, 38(4), 279-300.

K

Kanungo, D. P., Arora, M. K., Sarkar, S., & Gupta, R. P. (2009). Landslide susceptibility zonation (LSZ) mapping—a review. *J South Asia Disaster Stud*, 2(1), 81-105.

Kayastha, P., Dhital, M. R., & De Smedt, F. (2013). Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences*, 52, 398-408.

Kienholz, H. (1978). Maps of geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland: scale 1: 10,000. *Arctic and Alpine Research*, 169-184.

L

Lasko, T. A., Bhagwat, J. G., Zou, K. H., & Ohno-Machado, L. (2005). The use of receiver operating characteristic curves in biomedical informatics. *Journal of biomedical informatics*, 38(5), 404-415.

Ledoux, B. (1995). *Les catastrophes naturelles en France*. Payot.

Lee, S., & Min, K. (2001). Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental geology*, 40(9), 1095-1113.

Lee, S., Choi, J., & Min, K. (2002). Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. *Environmental Geology*, 43(1-2), 120-131.

Lee, S., Ryu, J. H., Min, K., & Won, J. S. (2003). Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(12), 1361-1376.

Leroi, E. (1996). Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments. *Landslides*, 1, 35-51.

Lissak, C. (2012). Coastal landslides of the Pays d'Auge (Calvados): Morphology, functioning and risk management (Doctoral dissertation, PhD Thesis, University of Caen, Caen, France, 312 pp).

M

Malet, J. P., Thiery, Y., Hervàs, J., Günther, A., Puissant, A., & Grandjean, G. (2009). Landslide susceptibility mapping at 1: 1M scale over France: exploratory results with a heuristic model. *proc. of Landslide process, from geomorphologic mapping to dynamic modelling. A tribute to Dr. Theo van Asch*, 315-320.

Maquaire, O. (2002). Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain):-processus, fonctionnement, cartographie (Doctoral dissertation).

Mărgărint, M. C., Grozavu, A. D. R. I. A. N., Patriche, C. V., Tomaşciuc, A. M. I., Urdea, R. O. X. A. N. A., & Ungurianu, I. O. N. U. Ţ. (2011). Évaluation des risques de glissements de terrain par la méthode de la régression logistique: application à deux zones basses de Roumanie. *Dynam. Environ*, 28, 41-50.

Mebarki, A. (2005). Hydrologie des bassins de l'Est algérien: ressources en eau, aménagement et environnement. Thèse de doctorat d'état. Université Mentouri de Constantine.

Melo, R., Vieira, G., Caselli, A., & Ramos, M. (2012). Susceptibility modelling of hummocky terrain distribution using the information value method (Deception Island, Antarctic Peninsula). *Geomorphology*, 155, 88-95.

Metz, C. E. (1978, October). Basic principles of ROC analysis. In *Seminars in nuclear medicine* (Vol. 8, No. 4, pp. 283-298). WB Saunders.

Montgomery, D. R., Schmidt, K. M., Greenberg, H. M., & Dietrich, W. E. (2000). Forest clearing and regional landsliding. *Geology*, 28(4), 311-314.

N

Nagarajan, R., Mukherjee, A., Roy, A., & Khire, M. V. (1998). Technical note Temporal remote sensing data and GIS application in landslide hazard zonation of part of Western ghat, India.

- Nefeslioglu, H. A., Sezer, E., Gokceoglu, C., Bozkir, A. S., & Duman, T. Y. (2010). Assessment of landslide susceptibility by decision trees in the metropolitan area of Istanbul, Turkey. *Mathematical Problems in Engineering*, 2010.
- Neuhäuser, B., & Terhorst, B. (2007). Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, 86(1), 12-24.
- Nijkamp, P., & Voogd, H. (1983). A survey of multicriteria analysis for development planning. In L. Chatterjee and P. Nijkamp, eds., *Urban and Regional Policy Analysis in Developing Countries*, 217-229.

P

- Pachauri, A. K., & Pant, M. (1992). Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering geology*, 32(1-2), 81-100.
- Parise, M. (2001). Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 26(9), 697-703.
- Park, S., Choi, C., Kim, B., & Kim, J. (2013). Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, analytic hierarchy process, logistic regression, and artificial neural network methods at the Inje area, Korea. *Environmental earth sciences*, 68(5), 1443-1464.
- Petley, D. N., Bulmer, M. H., & Murphy, W. (2002). Patterns of movement in rotational and translational landslides. *Geology*, 30(8), 719-722.
- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10), 927-930.
- Poiraud, A. (2012). *Les glissements de terrain dans le bassin tertiaire volcanisé du Puy-en-Velay (Massif central, France): caractérisation, facteurs de contrôle et cartographie de l'aléa* (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II).
- Porcher, M., & Guillope, P. (1979). Cartographie des risques ZERMOS appliquée à des plans d'occupation des sols en Normandie. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 99, 43-54.

Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2012). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural hazards*, 63(2), 965-996.

Pradhan, B. (2011). Use of GIS-based fuzzy logic relations and its cross application to produce landslide susceptibility maps in three test areas in Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 63(2), 329-349.

R

Raoult, J. F. (1974). *Géologie du centre de la chaîne numidique: nord du constantinois: Algérie*. Ed. Société géologique de France.

Reger, J. P. (1979). Discriminant analysis as a possible tool in landslide investigations. *Earth Surface Processes*, 4(3), 267-273.

Remaître, A. (2008). *Morphologie et dynamique des laves torrentielles: Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud)* (Doctoral dissertation, ANRT).

Rothé, J. P., Dechevoy, N., & Seltzer, P. (1950). Les séismes de Kerrata et la séismicité de l'Algérie. *Pauc*.

Roussel, J. (1973). L'activité sismique en Algérie de 1951 à 1970 inclus. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord*, 64(3-4), 211-228.

S

Saaty, T. L. (1980). *The Analytical Hierarchy Process, Planning, Priority. Resource Allocation*. RWS Publications, USA.

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2001). The seven pillars of the analytic hierarchy process. In *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process* (pp. 27-46). Springer US.

Safaei, M., Omar, H., Huat, B. K., Yousof, Z. B., & Ghiasi, V. (2011). Deterministic rainfall induced landslide approaches, advantage and limitation. *Electron J Geotech Eng*, 16, 1619-1650.

- Saha, A. K., Gupta, R. P., Sarkar, I., Arora, M. K., & Csaplovics, E. (2005). An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation—with a case study in the Himalayas. *Landslides*, 2(1), 61-69.
- Santacana, N., Baeza, B., Corominas, J., De Paz, A., & Marturiá, J. (2003). A GIS-based multivariate statistical analysis for shallow landslide susceptibility mapping in La Pobla de Lillet area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural hazards*, 30(3), 281-295.
- Savornin, J. (1920). *Etude géologique de la région du Hodna et du plateau sétifien*. Ancienne maison bastide-Jourdan, Jules carbonel, imprimeur-libraire de l'Université.
- Schuster, R. L. (1996). Socioeconomic significance of landslides. *Landslides: Investigation and Mitigation*. Washington (DC): National Academy Press. Transportation Research Board Special Report, 247, 12-35.
- Soeters, R., & van Westen, C. J. (1996). *Landslides: Investigation and mitigation*. Chapter 8-Slope instability recognition, analysis, and zonation. Transportation research board special report, (247).
- Stevenson, P. C. (1977). An empirical method for the evaluation of relative landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 16(1), 69-72.
- Süzen, M. L., & Doyuran, V. (2004). Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering Geology*, 71(3), 303-321.

T

- Terzaghi, K. (1960). *From theory to practice in soil mechanics: selections from the writings of K. Terzaghi*.

V

- Van'de Fliert, J. R., Delga, M. D., & Magne, J. (1958). Nouvelles données stratigraphiques et structurales sur la région d'oued-Athmenia. *Bulletin*, (20-21), 259.
- Van Den Eeckhaut, M., Vanwallegem, T., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., & Vandekerckhove, L. (2006). Prediction of landslide susceptibility using rare

- events logistic regression: a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology*, 76(3), 392-410.
- Van Westen, C. J. (1993). Application of geographic information systems to landslide hazard zonation (Doctoral dissertation, TU Delft, Delft University of Technology).
- Van Westen, C. J. (2000). The modelling of landslide hazards using GIS. *Surveys in Geophysics*, 21(2-3), 241-255.
- Van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural hazards*, 30(3), 399-419.
- Van Westen, C. J. (2004). Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments. *Landslides: evaluation and stabilization*. Balkema, Taylor& Francis Group, London, 1, 39-56.
- Van Westen, C. J., Van Asch, T. W., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult?. *Bulletin of Engineering geology and the Environment*, 65(2), 167-184.
- Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering geology*, 102(3), 112-131.
- Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. *Landslides and engineering practice*, 24, 20-47.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Special report*, 176, 11-33.
- Varnes, D. J. (1984). *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice* (No. 3). UNESCO Press, Paris. 63 pp.
- Vila, J. M. (1980). *La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens* (Doctoral dissertation).
- Voute, C. (1967). *Essai de synthèse de l'histoire géologique des environs d'Ain Fakroun, Ain Babouche et des régions limitrophes*. Service géologique de l'Algérie.

W

- Weng, Q. (2002). Quantifying uncertainty of digital elevation models derived from topographic maps. In *Advances in spatial data handling* (pp. 403-418). Springer Berlin Heidelberg.
- Wieczorek, G. F. (1984). Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction. *Bull Assoc Eng Geol*, 21(3), 337-342.
- Wildi, W. (1983). La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie): structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, 24(3), 201-297.
- WP/WLI. (1990). A suggested method for reporting a landslide Bulletin of the International Association of Geo-engineering properties and processes (Vol. 41).
- WP/WLI. (1993). A suggested method for describing the activity of a landslide Bulletin of the International Association of Geo-engineering properties and processes (Vol. 47).
- www.em-dat.net - Université Catholique de Louvain - Brussels - Belgium, 2007
- www.bgs.ac.uk - British Geological Survey, 2009

X

- Xu, C., Dai, F., Xu, X., & Lee, Y. H. (2012). GIS-based support vector machine modeling of earthquake-triggered landslide susceptibility in the Jianjiang River watershed, China. *Geomorphology*, 145, 70-80.

Y

- Yamaguchi, Y., Tanaka, S., Odajima, T., Kamai, T., & Tsuchida, S. (2003). Detection of a landslide movement as geometric misregistration in image matching of SPOT HRV data of two different dates. *International Journal of Remote Sensing*, 24(18), 3523-3534.

- Yao, X., Tham, L. G., & Dai, F. C. (2008). Landslide susceptibility mapping based on support vector machine: a case study on natural slopes of Hong Kong, China. *Geomorphology*, 101(4), 572-582.
- Yeon, Y. K., Han, J. G., & Ryu, K. H. (2010). Landslide susceptibility mapping in Injae, Korea, using a decision tree. *Engineering Geology*, 116(3), 274-283.
- Yin, K. L., & Yan, T. Z. (1988, July). Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. In *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides* (Vol. 2, pp. 1269-1272).

Annexes

Photographies













Glossaire

GLOSSAIRE

❖ **L'information géographique :** il s'agit au sens large de symboles qui représentent des mesures ou des observations collectées sur la surface terrestre pour caractériser des phénomènes divers, sociaux, techniques, naturels... Les symboles en question peuvent être sous forme de textes ou de nombres ou de graphiques. Ils sont de plus en plus souvent au format numérique dès la collecte, comme les données issues des satellites d'observation de la terre, ou numérisées dans un second temps comme les cartes anciennes par exemple. Les données correspondent à des valeurs brutes, dont la méthodologie de collecte est connue et validée mais qui ne sont pas interprétées.

La sélection, la combinaison ou la transformation des données en fonction d'objectifs précis les transforment en information géographique grâce aux Systèmes d'Information Géographique (SIG). Avant d'être utilisées, les données brutes doivent être conceptualisées dans des modèles de données afin de les structurer, les organiser, les classer et de les définir.

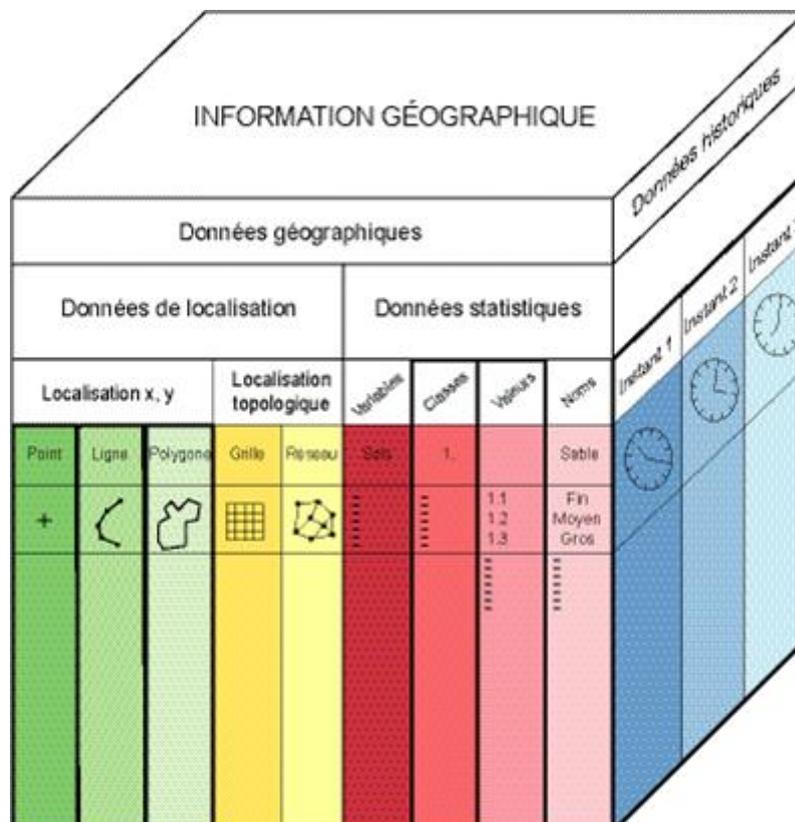


Figure 64. Cube de l'information géographique (Dangermond, 1983)

- ❖ **L'inventaire des glissements** : l'inventaire définit la localisation, la typologie, la classification, l'identification de la taille, du volume, de la date d'occurrence et d'aires caractéristiques des mouvements de versant. Ceci constitue la première étape de l'analyse qui peut constituer une première approche de la susceptibilité.
- ❖ **La cartographie de la susceptibilité** définit la localisation et la caractérisation des mouvements de versant identifiés sur le site d'étude, ainsi que l'estimation des zones pouvant potentiellement être affectées dans le futur. Elle concerne principalement les zones "*sources*" des mouvements de versant (zones de rupture) et, intègrent parfois des informations sur les zones pouvant être touchées par la propagation et/ou la régression des mouvements. Les zones potentiellement soumises à la rupture et les zones soumises à la propagation/régression des mouvements sont généralement analysées de manière indépendante. La susceptibilité ne tient pas compte de la fréquence des mouvements de versant (probabilité annuelle), ni de leur intensité (volume et magnitude potentielle) ;
- ❖ **La cartographie de l'aléa** se base généralement sur la cartographie de la susceptibilité, à laquelle est intégrée la dimension temporelle (probabilité annuelle). L'aléa est exprimé comme la fréquence d'un type particulier de mouvement, d'un certain volume et/ou d'une certaine intensité.
- ❖ **La cartographie des risques** permet d'aider les décideurs à aménager le territoire en prenant en compte le risque. Il est généralement défini comme étant à la croisée d'un phénomène naturel dommageable, aussi appelé aléa, et d'enjeux (ou éléments à risques) présentant une certaine vulnérabilité (Fig. 64).

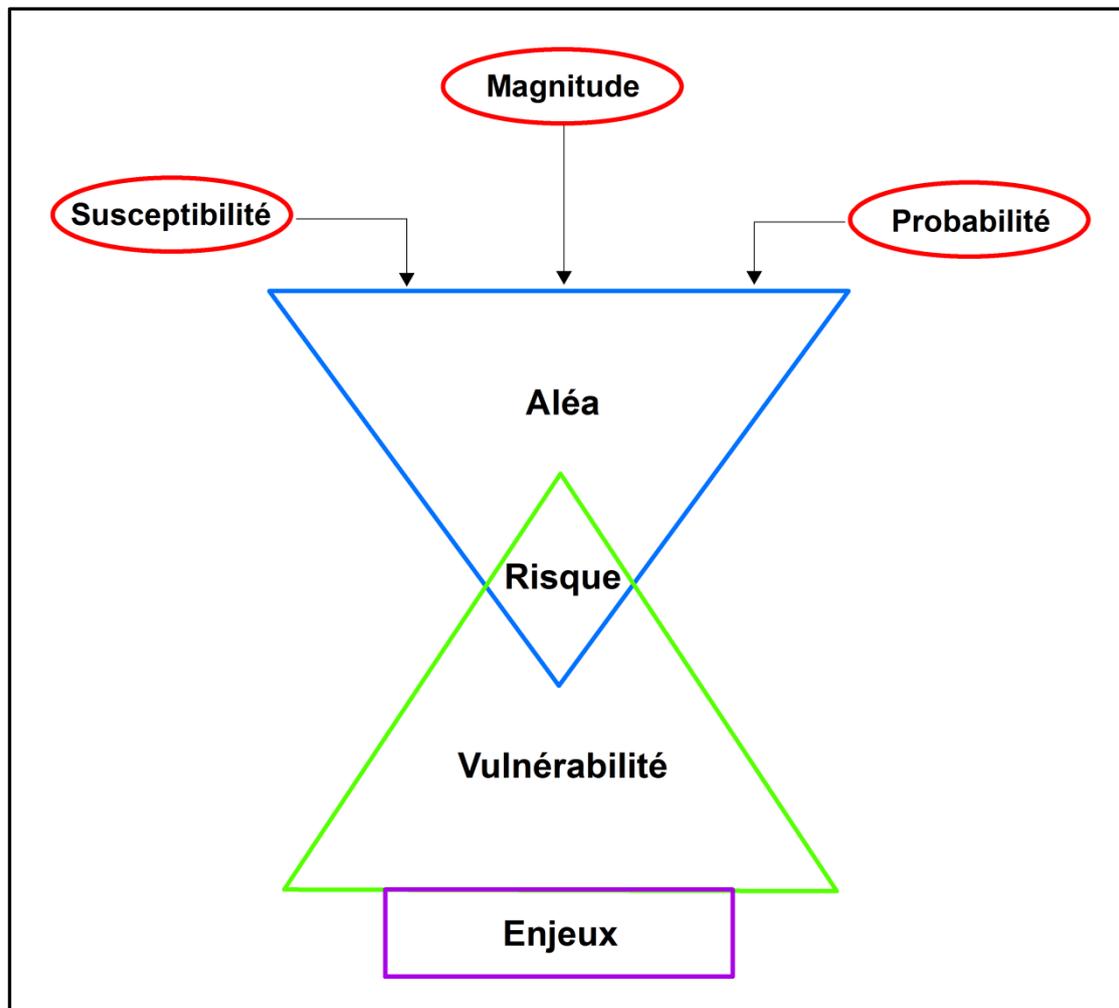


Figure 65. Définition du risque naturel

- ❖ **Le mode raster ou maillé** représente l'espace selon un maillage régulier appliqué sur la surface terrestre. Ce maillage se fait sous forme d'une grille formée de cellules de taille prédéterminée auxquelles sont attribuées des valeurs spécifiques. La taille de la cellule s'appelle la résolution spatiale. Le mode raster correspond à une vue du monde où les phénomènes varient de manière continue sous forme de champs, au sens physique du terme, comme un champ magnétique par exemple. La grille raster peut alors être vue comme une grille d'échantillonnage de ce champ continu où chaque pixel est un élément d'un échantillon de la réalité étudiée. Il s'oppose conceptuellement au mode **vecteur**, fondé sur un découpage a priori du monde en entités bien distinctes, effectué dans un espace discret (au sens mathématique du terme) où chaque polygone est un élément d'un échantillon de la réalité étudiée.

A chaque cellule est attribuée une valeur qui peut correspondre à une mesure (pollution, altitude), à une catégorie (type de végétation), à l'identifiant d'un objet (code d'une commune, numéro d'une route, d'une école), à un code couleur issu du scan d'une carte topographique ou à une valeur mesurée par un capteur placé sur un satellite. Dans le mode raster, un objet du monde réel n'est pas explicitement décrit, seule la cellule de la grille existe dans le système. Pour retrouver un objet, il faut demander au système d'afficher toutes les cellules portant le code correspondant à cet objet.

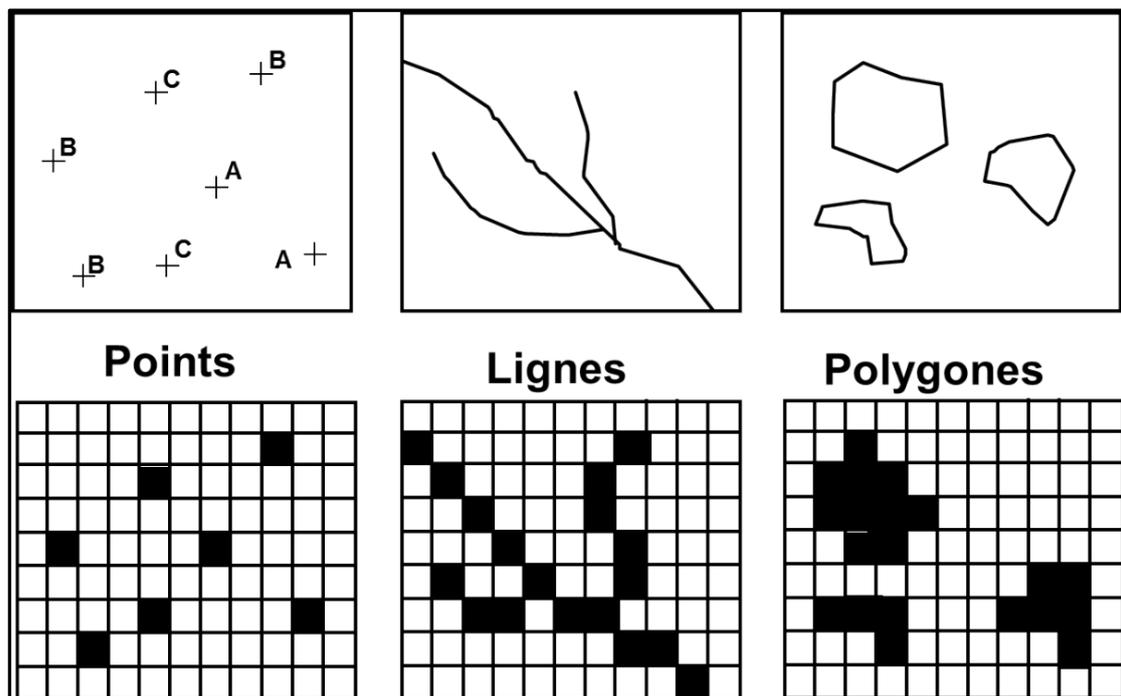


Figure 66. Schéma Raster

❖ **Le mode vectoriel** correspond à une vue discrète du monde, constitué d'entités distinctes, contrairement au mode **raster** qui correspond à un modèle continu. Dans le mode vecteur les entités du monde réel sont traduites au moyen de formes géométriques exprimant leur contour. Il existe trois grandes formes de base : les points, les lignes et les polygones. Ces formes se traduisent numériquement par des paires de coordonnées (x,y) ou des triplets (x,y,z) dans les SIG 3D. Les structures vectorielles peuvent être plus ou moins complexes. Si les relations géométriques de contiguïté et de connexion ne sont pas prises en compte, on parle d'un modèle spaghetti. Dans le modèle le plus simple, les points sont stockés géographiquement sous formes de paires de coordonnées, les lignes sous forme de séries de paires de coordonnées et les polygones comme des séries de paires de coordonnées dont la

dernière est identique à la première (fermeture du contour). Le modèle topologique permet de prendre en compte le fait que deux polygones contigus partagent une ligne et que deux lignes se croisent en un point qui leur est commun. Une manière de construire un modèle vecteur topologique et d'envisager les points comme des éléments de base, les lignes comme des connexions entre ces points et les polygones comme des agencements de lignes connectées entre elles. Dans une structure de données vectorielles, il faut distinguer les nœuds qui établissent les connexions entre les objets et les sommets qui construisent leur forme.

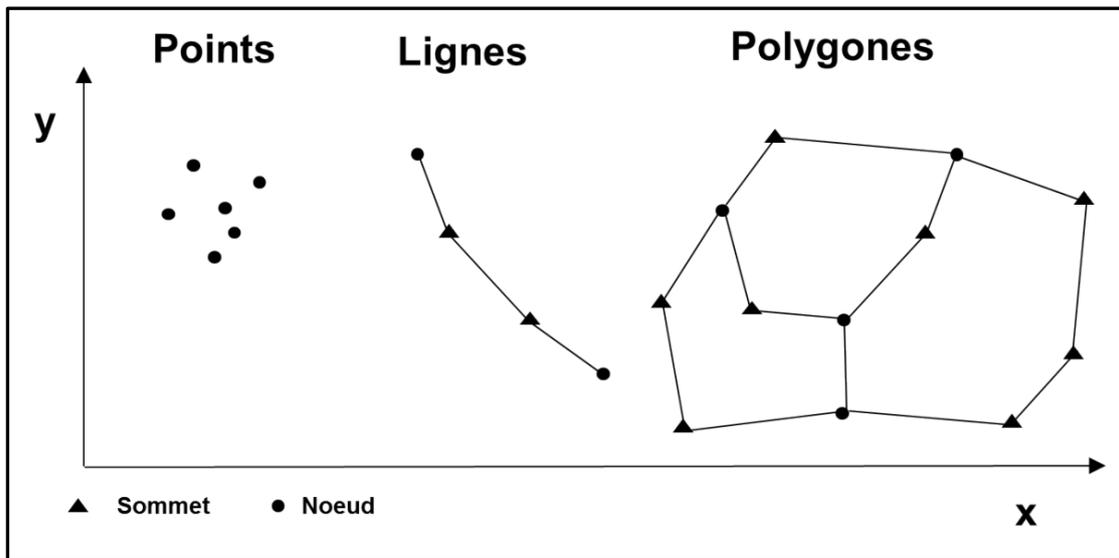


Figure 67. Schéma Vecteur

Article

Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria

Yacine Achour^{1,4} · Abderrahmane Boumezeur² · Riheb Hadji³ · Abdelmadjid Chouabbi⁴ · Victor Cavaleiro⁵ · El Amine Bendaoud⁶

Received: 18 October 2016 / Accepted: 3 April 2017
© Saudi Society for Geosciences 2017

Abstract This research work deals with the landslide susceptibility assessment using Analytic hierarchy process (AHP) and information value (IV) methods along a highway road section in Constantine region, NE Algeria. The landslide inventory map which has a total of 29 single landslide locations was created based on historical information, aerial photo interpretation, remote sensing images, and extensive field surveys. The different landslide influencing geoenvironmental factors considered for this study are lithology, slope gradient, slope aspect, distance from faults, land use, distance from streams, and geotechnical parameters. A thematic layer map is generated for every geoenvironmental factor using Geographic Information System (GIS); the lithological units and the distance from faults maps were extracted from the geological database of the region. The slope gradient, slope aspect, and distance from streams were calculated from the Digital Elevation Model (DEM). Contemporary land use map was derived from satellite images and field study.

Concerning the geotechnical parameters maps, they were determined making use of the geotechnical data from laboratory tests. The analysis of the relationships between the landslide-related factors and the landslide events was then carried out in GIS environment. The AUC plot showed that the susceptibility maps had a success rate of 77 and 66% for IV and AHP models, respectively. For that purpose, the IV model is better in predicting the occurrence of landslides than AHP one. Therefore, the information value method could be used as a landslide susceptibility mapping zonation method along other sections of the A1 highway.

Keywords Information value (IV) · Landslide susceptibility index (LSI) · Analytic hierarchy process (AHP) · Remote sensing · Algeria

Introduction

Landslides are one of the most common geohazards in many parts of the world. They constitute a major hazard for human activities often causing economic losses, property damages and high maintenance costs, as well as injuries or fatalities (Das et al. 2012).

Landslides indicate the movement of a mass of rock, debris, or earth down a slope (Cruden and Varnes 1996). These discrete events occur as a result of the interplay of a number of intrinsic and no-intrinsic factors. On other hand, anthropogenic activities such as road cuts, housing projects, and deforestation can also contribute to landslide initiation when the geoenvironmental factors are favorable aided by rainfall or earthquakes, (Dai and Lee 2002; Das et al. 2010). It is essential to develop a good understanding on the interplay between the predisposition and triggering factors which leads to landslide occurrence in any area (Hadji et al. 2013).

✉ Yacine Achour
y.achour@univ-bba.dz

¹ Department of Civil Engineering, Bordj Bou Arreridj University, 34030 El Annasser, Algeria
² Department of Earth Sciences, Tebessa University, 12000 Tebessa, Algeria
³ Department of Earth Sciences, Institute of Architecture and Earth Sciences, Setif University, 19000 Sétif, Algeria
⁴ Laboratory of Geodynamics and Natural Resources, Badji Mokhtar University, B.P.12, 23000 Sidi Amar, Algeria
⁵ Department of Civil Engineering, Beira Interior University, Av. Marques d'Avila Bolama, 6200-001 Covilhã, Portugal
⁶ Department of Civil Engineering, Setif University, 19000 Sétif, Algeria

Over the last decades, a variety of approaches for landslide susceptibility mapping have been developed and applied worldwide. The techniques used to map a region's landslide hazard can typically be labeled as being either a qualitative or quantitative approach (Guzzetti et al. 1999). Qualitative methods depend on expert experience and, hence, can be mentioned as subjective (Aleotti and Chowdhury 1999). Quantitative approaches use numerical tools to assess the mathematical relationship between slope instability and the controlling factors. Hence, they are considered as objective (Guzzetti et al. 1999). In the quantitative approaches two methods are generally considered: deterministic and statistical. In the first one, the potential of a landslide occurrence is assessed by a safety factor (Fos) using limit equilibrium or numerical analysis methods (Zhou et al. 2003). Although this method is the most accurate in predicting landslide occurrence, difficulties in acquiring the spatial variability of the geotechnical and phreatic parameters makes this method inadequate for large areas (Van Westen et al. 1997). The statistical methods are developed to overcome the subjectivity arising from the expert approach and the data acquisition in the mechanical methods. They are based on the statistical combination between conditioning factors and occurred landslides in the study area (Dai and lee 2002; Fall et al. 2006). Both bivariate and multivariate statistical methods have been applied by several researchers to evaluate landslide susceptibility with a significant success (Ayalew and Yamagishi 2005; Saha et al. 2005; Lee et al. 2007; Lee and Pradhan 2007; Das et al. 2010; Choi et al. 2012; Melo et al. 2012; Meinhardt et al. 2015). A newer approach to landslide susceptibility evaluation is to use data mining, analytic hierarchy process (AHP), neuro-fuzzy and fuzzy logic, and artificial neural network (ANN) models (Lee et al. 2004; Ayalew et al. 2005; Lee and Evangelista 2006; Melchiorre et al. 2008; Akgun and Türk 2010; Poudyal et al. 2010; Pradhan and Lee 2010; Yalcin et al. 2011; Kayastha et al. 2013). Other methods have also been proposed, including the frequency ratio (Pradhan and Lee 2010; Yalcin et al. 2011) and weights of evidence (WoE) (Van Westen et al. 2003; Neuhäuser and Terhorst 2007).

Landslide susceptibility mapping is a novel approach in Algeria; it can be used as an efficient tool which can give additional efforts in landslides mitigation. So far, few attempts at landslide susceptibility mapping were applied in Algeria (Bourenane et al. 2015; Hadji et al. 2017). The A1 highway, or "East-West Highway (EWH)" as it is also called, is considered as Algeria's most important road project. The length of the highway corridor (1200 km) is divided into three sections: western, central, and eastern. The study area is located in the eastern one which is characterized by a large exposure to slope instabilities and landsliding according to climatic and physiographic conditions. The dominant topographic features are the result of very active tectonic events; they are mainly high

rise mountain chains, depressions, and deep valleys. Neo-tectonic, to which the area has been subjected, has resulted in many land movements before any human intervention. The highway corridor was chosen to skirt Constantine City from its eastern side. The achievement of this section requires a lot of excavation works, embankments construction, tunneling, etc. Nevertheless, in several locations, these works disturb the natural equilibrium and trigger potential instabilities of different magnitudes that may threaten the safety of highway users. In the study area, the worst recent event occurred in January 2014, when a mass wasting was responsible for the collapse of the left tube of the tunnel 1 of Jebel El Ouahch (Fig. 1). This incident led to the closing of the EWH section between Constantine and Annaba.

The aim of this paper is to provide and develop a deterministic-statistical compiled approach for landslide susceptibility assessment by applying two different methods along a highway road section. The first is analytic hierarchy process which is a multi-parametric method that was originally developed by Saaty (1980). The second one is a statistical approach based on information value, known as the statistical index method that was proposed by Yin and Yan (1988) and modified slightly by Van Westen (1993). These models are tested, and the results are discussed.

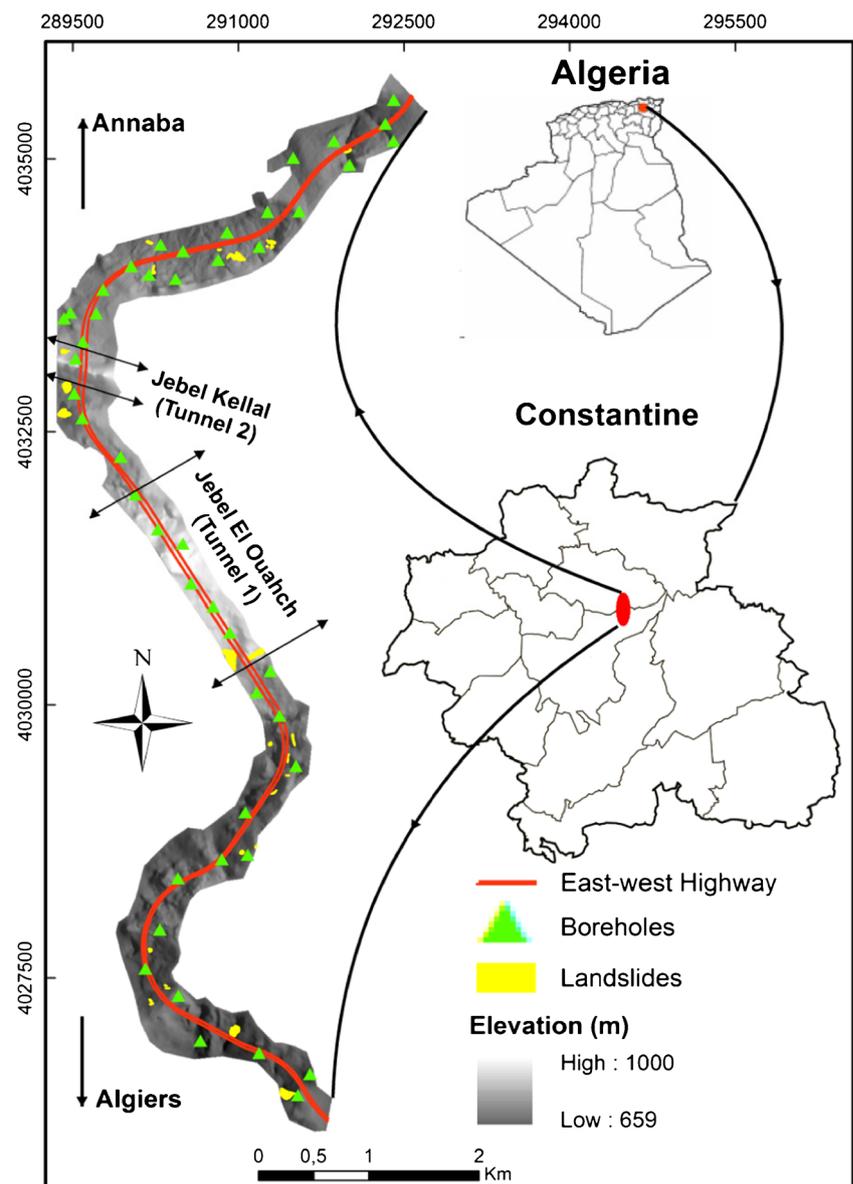
The study area

The study area is located in the east of Constantine City between latitude 4,026,087 to 4,035,781 m N and longitude 289,356 to 292,706 m E (WGS84 UTM 32 N) with a total surface area of approximately 5.83 km². The EWH corridor passes through the area over a length of 13 km, and it includes two tunnels. The first one is located in the middle of the study area; it cuts from south to north Jebel El Ouahch with a length of 1891.5 m. The second is located 1.3 km north of the first one; it crosses Jebel Kellal along a north–south direction over a length of 295 m. (Fig. 1).

Data from the National Meteorological Office (ONM) of Algeria indicate that for the last 20 years, the mean annual temperature was 16 °C, and the mean annual precipitation was 556 mm. The main rainfall events occur between December and February, while the summer drought frequently lasts from June to August. The slope angles in the area range between 0° and 42°, and the altitudes range between 659 and 1000 masl near Jebel El Ouahch.

The geology of the area is highly complicated. From the previous geological studies (Guiraud 1973; Raoult 1974; Vila 1980), the interpretation of the geological map (Figs. 2 and 3), the site investigation boreholes for tunneling, observations of tunnels side walls that cross under Jebel El Ouahch and Jebel Kellal (Fig. 4), and the field observations reveal highly fractured and folded geological units which are in reality

Fig. 1 Location map of the study area, with raster DEM (5 * 5 m) and the mapped landslides locations



superimposed thrust sheets. The major lithological units are represented by allochthonous cretaceous marl unit and the Neritic limestone at the base. The limestone has an east–west direction and dips steeply to the south (60°–90°). The marly allochthonous unit is highly fractured (Fig. 2) with two major joint fracture sets with directions N 110° and N 150°. Both the above units are cut perpendicularly by the second tunnel under Jebel Kellal.

These units are covered in the region of Jebel El Ouahch by the Numidian thrust sheet (Oligocene) formed by coarse grained massif sandstone beds at the top and thick clay at the base. These sandstones are presented in thick beds of north–south direction and dipping 20° east. They are cut by a network of fractures with interspace of the order of a decimeter (Fig. 2). The fractures planes are steeply dipping (60° to 90°) with directions N 50 to N 70° east, N 80 to N 90° east,

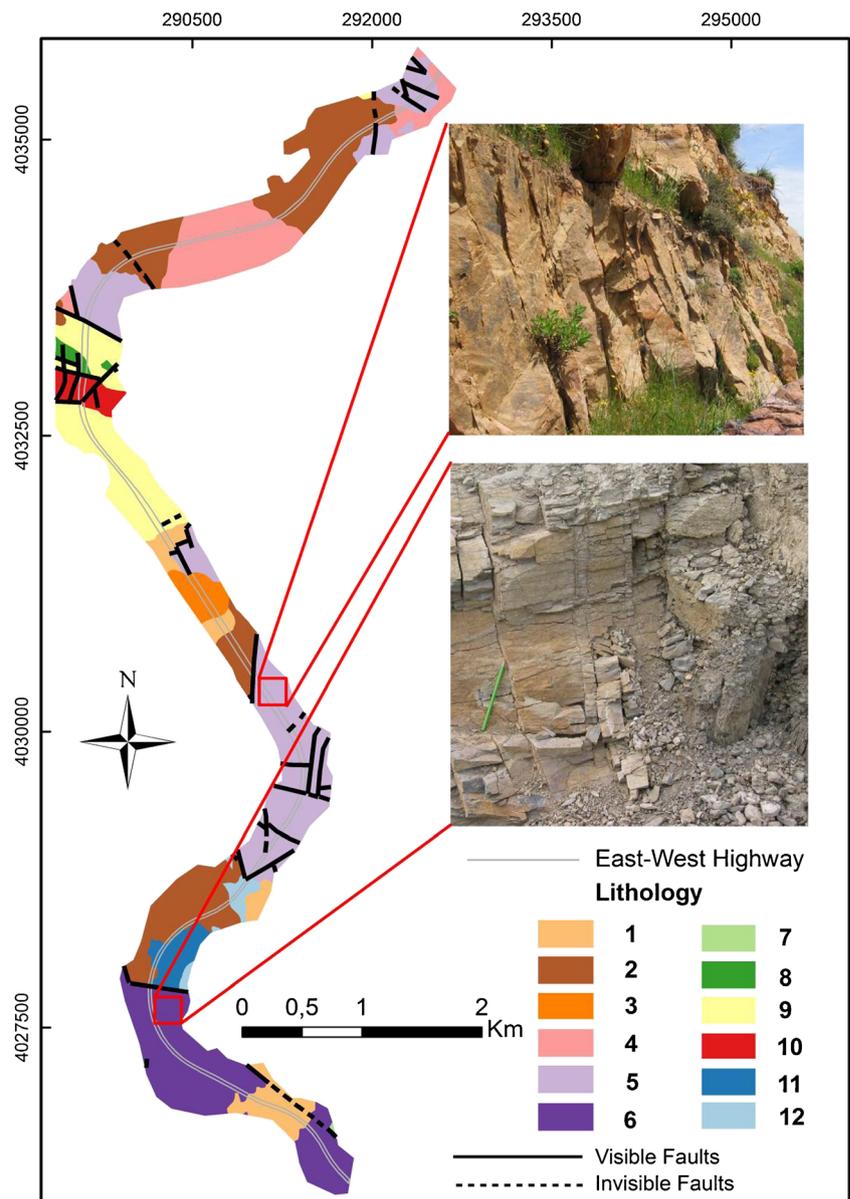
and N 160° east. This structural framework has induced a major problem of stability where a big collapse at the entrance of tunnel 1 has led to its closure. All the abovementioned units are mantled by thick cover of colluviums of a few several meters constituted mainly of sandstone blocks with a clay–sand matrix, of quaternary age.

The study area is prone to slope instability phenomena because of its lithological and structural characteristics. Some of the landslides are shown in Fig. 5.

Methodology and characterization of predisposing factors

A representative landslide database is a prerequisite for any landslide hazard or risk assessment (Varnes 1984). The study

Fig. 2 Geological map of the study area: (1) recent screes (Quaternary), (2) arable land (Quaternary), (3) old glacis with pebbles (Salétian), (4) conglomerate and sandy clay (Mio-Pliocene), (5) Numidian sandstone, (6) marl and clay with boulders (Priabonian), (7) clear limestone (Ypresian–Lower Lutetian), (8) flinty limestone (Ypresian–Lower Lutetian), (9) yellow boulder's containing black marl (Maastrichtian–Paleocene), (10) limestone of Djebel Oum Settas (Cenomanian), (11) limestone with Miliolidea (Aptian), (12) dolomitic limestone (Barremian)

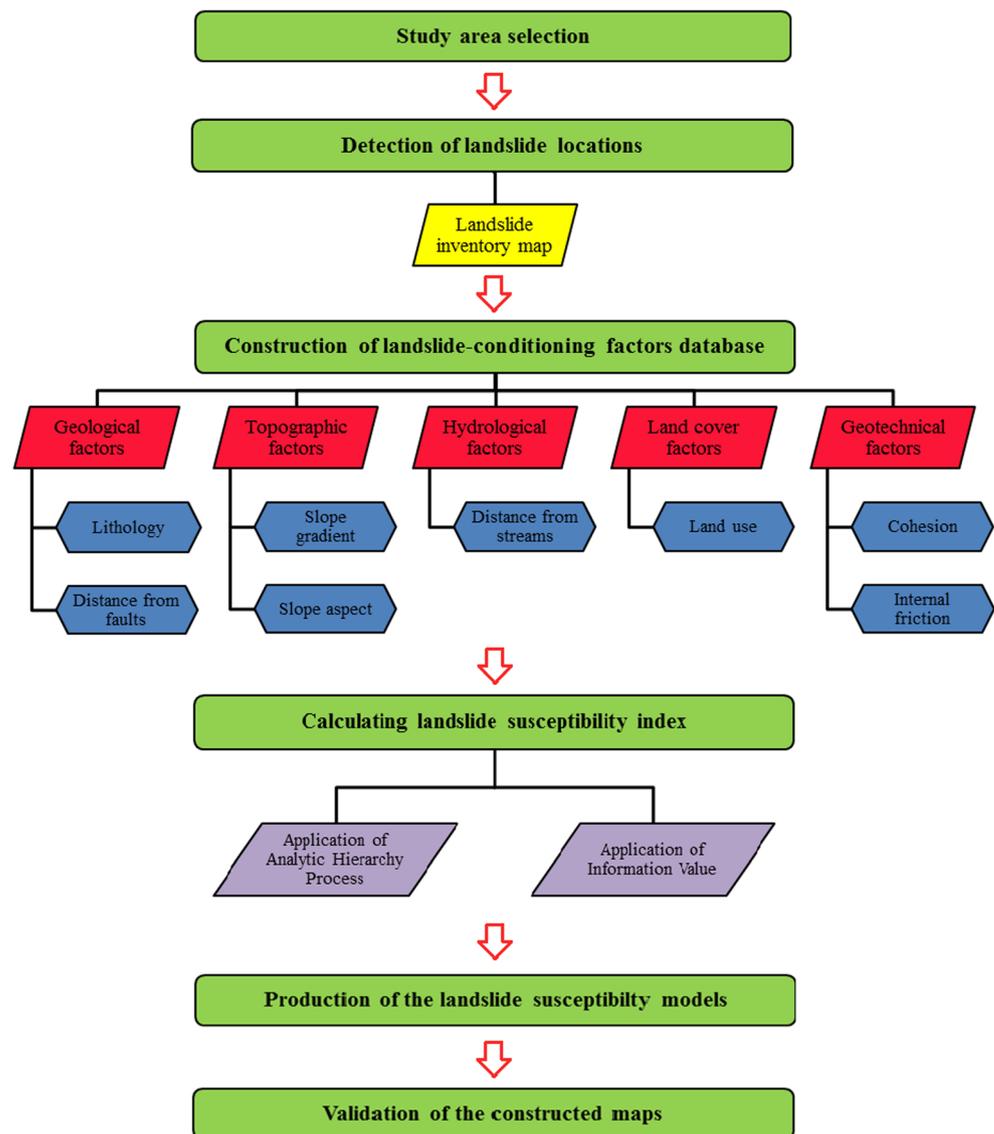


began with the preparation of a landslide inventory map based on historical information, aerial photo interpretation, remote sensing images, and field surveys. Data concerning landslide locations and conditioning factors were digitalized and stored in GIS for further analysis, interpretation, and graphical representation. Analytic hierarchy process and information value methods are used to prepare landslide susceptibility maps for the studied area using the ArcGIS software. The statistical analysis is carried out utilizing an external statistical package (MS Excel software). After reclassification using the natural break classification method, the resulted maps represent the final landslide susceptibility models. Finally, validation of the two models was carried out to select the most excellent landslide susceptibility map for the study area. The applied methodology of the work has shown in Fig. 3.

Landslide inventory map

It is recognized that landslide inventories are the simplest form of landslide mapping (Guzzetti et al. 1999). They offer information about the spatial distribution of the present landslide locations and, when known, the date of occurrence and types of landslides that have left discernible traces in an area. The landslide inventory map is essential for studying the relationship between landslide occurrence and its causative factors. It can be prepared either by collecting historical information of individual landslide event or by using satellite imageries and aerial photographs coupled with field surveys (Kayastha et al. 2013). The landslides in the study area were identified using the historical records of the National Highway Agency (ANA) of

Fig. 3 Flow chart showing the methodology of the whole process of the work



Algeria as well as Landsat 7 images. They were confirmed and updated by field reconnaissance using a hand held GPS.

A total of 29 landslides were mapped (Fig. 1). The smallest landslide that was identified in the field has an area of 77 m², while the largest one was 12,515 m². The landslides cover about 0.058 km² of the 5.83 km² study area, which is approximately 1%. Landslides are frequent in the southern region of the study area, occupied by highly fractured marl and sandstone formations, whereas they are less frequent in the northern region, where geological formations consist of limestone units.

Landslide conditioning factors

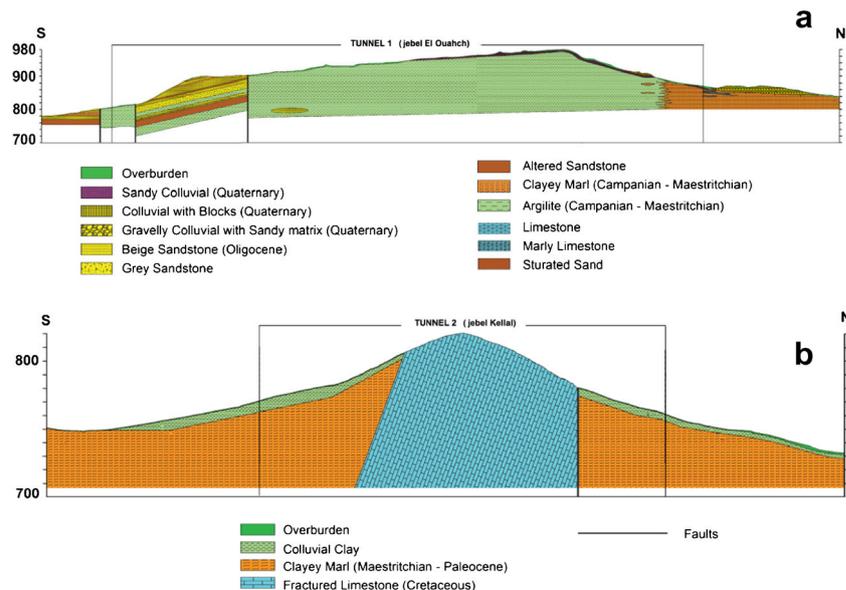
Selecting the appropriate conditioning factors with significant contribution in landsliding to create a model is a challenge

(Ayalew and Yamagishi 2005). There are no universal guidelines regarding the selection of factors in landslide susceptibility mapping. The factors selected for landslide susceptibility assessment in a GIS-based study must be operational, complete, non-uniform, fundamental, and measurable (Ayalew and Yamagishi 2005). Based on the above criteria, lithology, slope gradient, slope aspect, distance from fault, land use, distance from streams, and shear strength parameters (cohesion and angle of internal friction), a total of eight potential predisposing factors were considered in this study. A brief description of every presumed controlling factor is given below.

Lithology

Lithology plays an important role in landslide susceptibility mapping (Dai et al. 2001).

Fig. 4 Geological cross-sections along (a) tunnel 1 and (b) tunnel 2



Lithological characteristics of an area were related to the landslide event. It is widely accepted that lithology considerably influences the occurrence of landslides, because lithological variations often lead to a difference in the strength and permeability of rocks and soils. The lithological units were extracted from the 1:50,000 geological map of the region in the form of a simplified digitized lithological map. Formations were grouped into: (i) recent screes (Quaternary), (ii) arable land (Quaternary), (iii) old glacia with pebbles (Salétian), (iv) conglomerate and sandy clay (Mio-Pliocene), (v) Numidian sandstone, (vi) marl and clay with boulders (Priabonian), (vii) clear limestone (Ypresian–Lower Lutetian), (viii) flinty limestone (Ypresian–Lower Lutetian), (ix) yellow boulder's containing black marl (Maastrichtian–Paleocene), (x) limestone of Jebel Oum Settas (Cenomanian), (xi) limestone with Miliolidea (Aptian), and (xii) dolomitic limestone (Barremian), (Fig. 2).

Topographic parameters

Topographic parameters are the most important geomorphological factors that influence slope stability (Dai and Lee 2002; Guzzetti et al. 2005; Galli et al. 2008). A 1/5000 topographic map, provided by the ANA was used in the present study to generate a DEM with 5 * 5-m resolution (Fig. 1). From this DEM, slope angle and slope aspect thematic layers were prepared. The slope angle is the primary factor used in the slope stability analyses because the shear forces are directly influenced by the slope gradient (Lee and Min 2001). The increase of this factor increases the probability of occurrence of landslides. Landslides in the study area are initiated on natural as well as cut slopes of the road corridor. The slope angle map was subdivided into five classes of inclination: (i) 0–5°, (ii) 5–10°, (iii) 10–15°, (iv) 15–25°, and (v) >25°

(Fig. 6a). Slope aspect associated parameters such as exposure to sunlight, drying winds, rainfall (degree of saturation), and discontinuities may affect the occurrence of landslides (Süzen and Doyuran 2004). Slope aspect map (Fig. 6b) contain eight classes: (i) north (N), (ii) northeast (NE), (iii) east (E), (iv) southeast (SE), (v) south (S), (vi) southwest (SW), (vii) west (W), and (viii) northwest (NW) (Das et al. 2010).

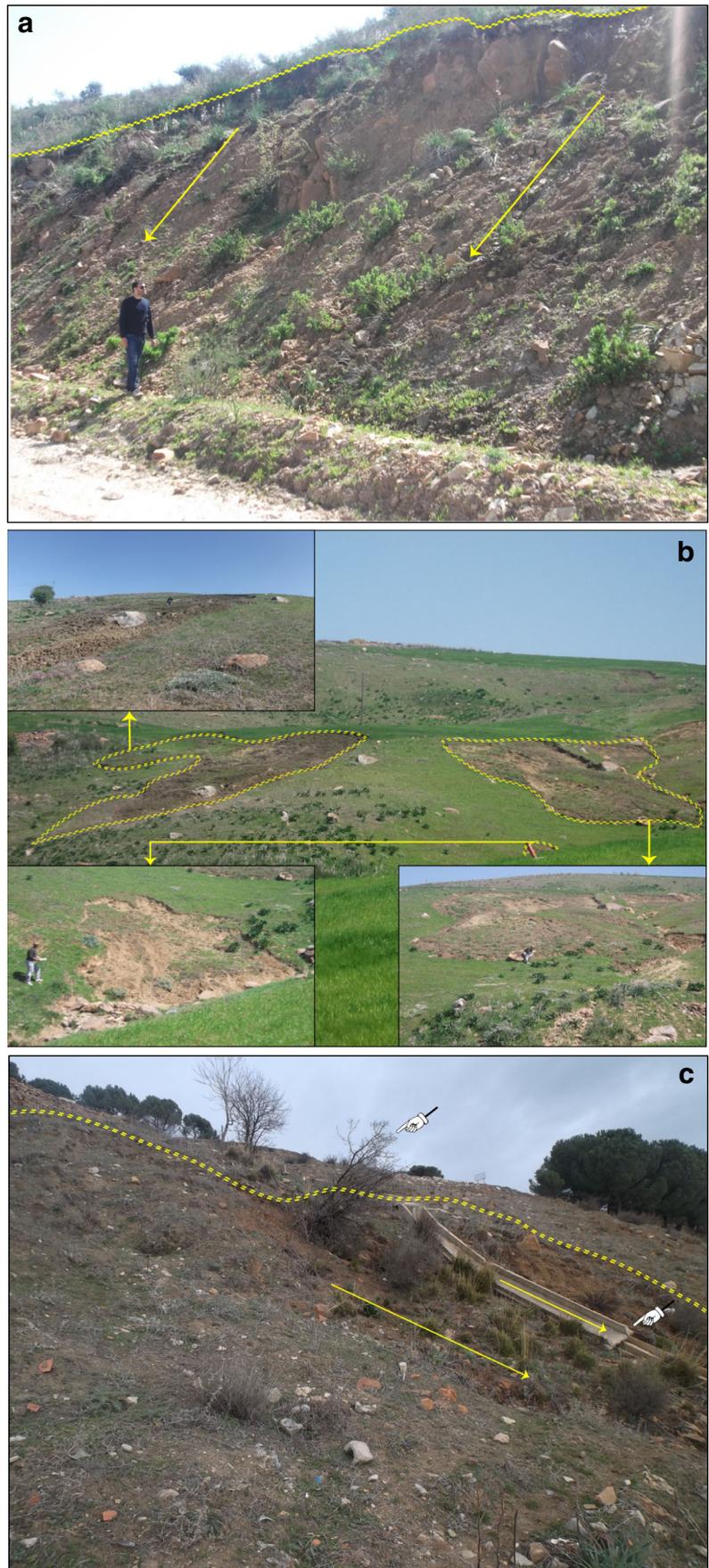
Distance from faults

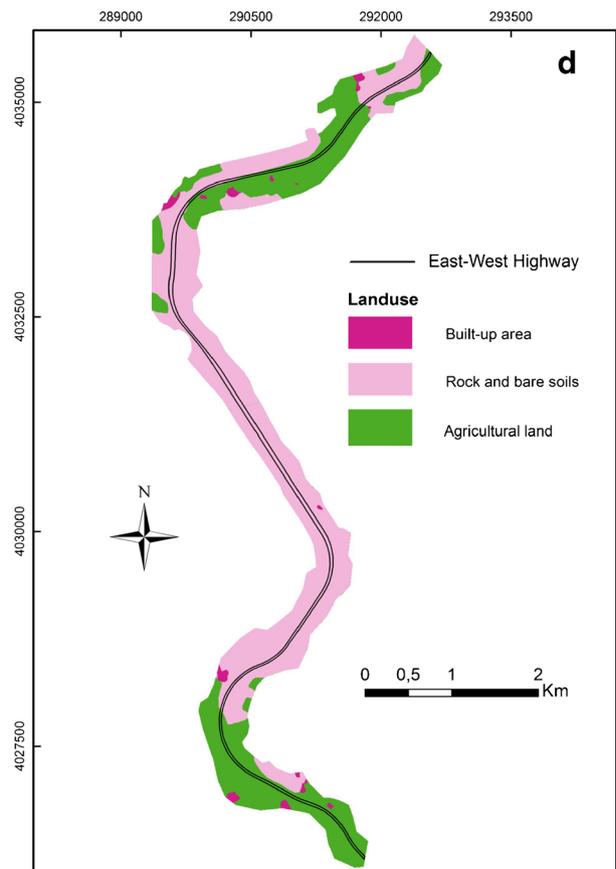
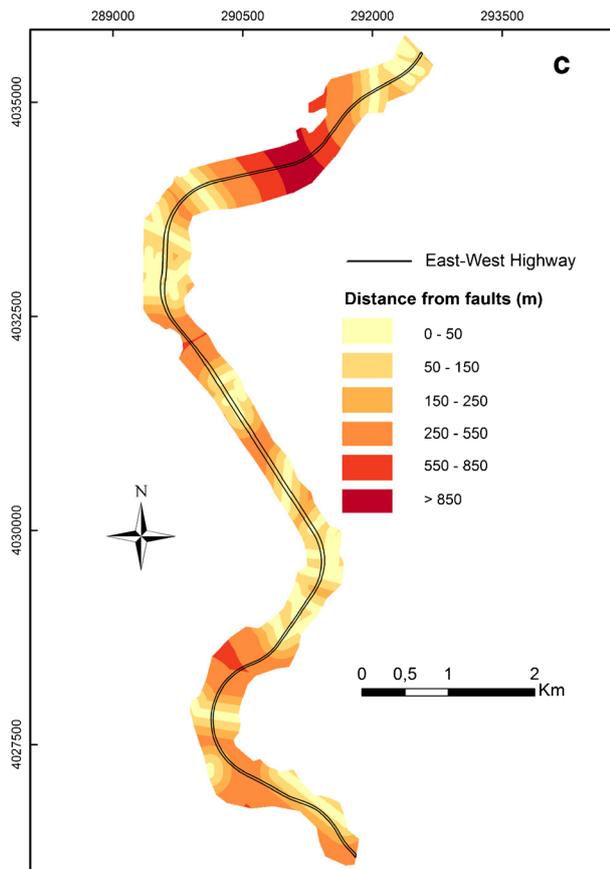
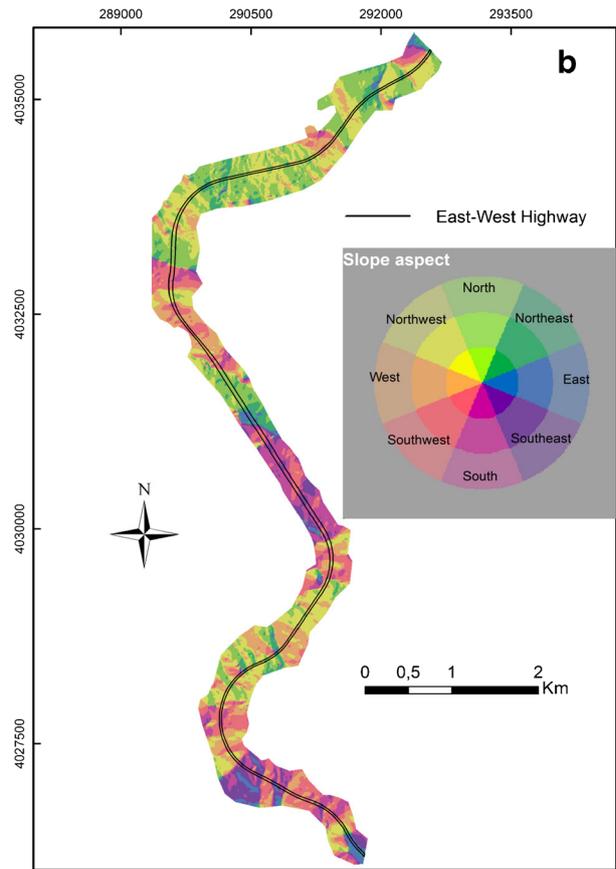
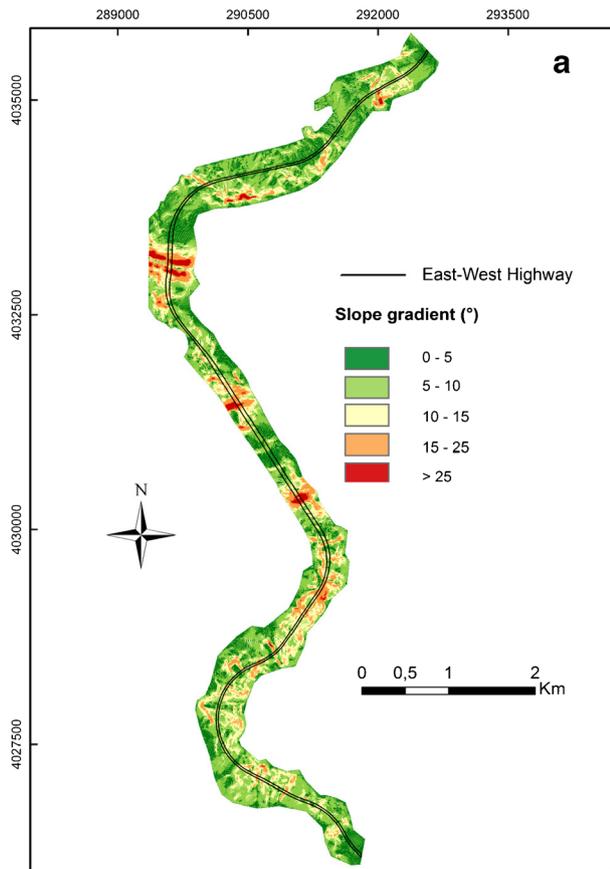
Active faults increase landslide susceptibility because rocks near a fault are weaker, due to intense shearing (Leir et al. 2004). Distance from faults increases the likelihood of occurrence of landslides (Pradhan and Lee 2010). Fault lineaments were digitized from the geological map of the region and updated by remote sensing and an extensive field work. A digital thematic distance from faults map was produced by creating six buffer zones around polylines: (i) 0–50 m, (ii) 50–150 m, (iii) 150–250 m, (iv) 250–550 m, (v) 550–850 m, and (vi) >850 m (Fig. 6c).

Land use

Many studies have reported the strong role of land use in the contribution to the occurrence of landslides (Lee et al. 2013). Barren slopes are more prone to landslides. In contrast, vegetative areas tend to reduce the action of climatic agents such as rain. Based on Landsat 7 satellite images and field study, three land use classes were considered: (i) built-up area, (ii) rock and bare soils, and (iii) agricultural fields. About 60% of the study area is represented by rock and bare soils and the remainder is agricultural fields and built-up area (Fig. 6d).

Fig. 5 Photographs of landslides in the study area. **a** Landslide along tracks passageway, near EWH highway corridor, **b** 200 m in the east side of the EWH highway corridor, and **c** land instability affecting the slope above the entrance of tunnel 1





◀ **Fig. 6** Landslide susceptibility predisposing factors: **a** slope, **b** aspect, **c** distance from faults, **d** land use, **e** distance from streams, **f** cohesion, and **g** angle of internal friction

Distance from streams

The saturation degrees of the materials directly affect slope stability. The proximity to the drainage network is an important factor in terms of stability. Streams may negatively affect stability by eroding or by saturating the toe materials of the slopes and hence reducing their shear resistance (Dai et al. 2001; Saha et al. 2002). For this study, the distance from streams map was divided into five classes: (i) 0–50 m, (ii) 50–100 m, (iii) 100–150 m, (iv) 150–200 m, and (v) >200 m (Fig. 6e).

Geotechnical criterion

In this research, we attempt to apply a co-deterministic-statistical coupled approach inasmuch the availability of geotechnical data. We considered necessary to introduce these parameters, because they are very interpretative in slopes stability. Geotechnical data were obtained from the National Highways Agency (ANA) which carried out geotechnical investigations and testing along 13 km of the road corridor during the period of 2005–2007. The mechanical parameters used in this study are the angle of internal friction and cohesion. Thematic layers (Fig. 6f, g) are prepared for the encountered outcrops based on mean values of these parameters from boreholes. Over 45 boreholes were undertaken by the ANA, as shown in Fig. 1. The spatial distribution of the landslides closely reflects the different geotechnical properties of the outcropping geological formations.

The above vectors layers were converted into raster format with 5 * 5-m grid cells and the spatial datasets were processed in the Arc GIS software.

Landslide susceptibility analysis

Landslide susceptibility mapping and analysis is done using analytic hierarchy process and information value methods.

Analytic hierarchy process

Analytic hierarchy process (AHP) is a multi-criteria decision-making method that was originally developed by Saaty (1980). The AHP gained wide application in site selection, suitability analysis, regional planning, and landslide susceptibility analysis (Ayalew et al. 2005). It has been successfully employed in landslide susceptibility mapping by several investigators (Ayalew and Yamagishi 2005; Wu and Chen 2009; Kayastha et al. 2013). AHP involves building a hierarchy of decision elements (factors) and then making comparisons

between possible pairs in a matrix to give a weight for each factor and also a consistency ratio as described by Saaty and Vargas (2012). This will describe the importance of each factor relative to every other factor (Saaty 2003). In AHP, each factor is rated against every other factor by assigning a value between 1 and 9, if the factors have a direct relationship. Conversely, the value varies between the reciprocals 1/2 and 1/9 (Table 1; Saaty 1977).

The important steps of the AHP process are (1) standardizing the factors, (2) determining the weight of each factor, and (3) aggregating the criteria. In the first step, factors and their spatial representation should be associated with a common scale to make comparisons possible. The level of susceptibility was set to 0, if a class of a factor has no influence. Conversely, a level of susceptibility of 255 was given. In the second step, a comparison matrix is constructed, and each factor is compared with the other factor, relative to its importance. The quality of the comparison is described by the consistency ratio (CR), which is calculated as the ratio of the (CI) and the random index (RI), as indicated in Eq. 1.

$$CR = CI / RI \quad (1)$$

A matrix with a satisfactory consistency level should yield a CR of less than 0.10. The low consistency ratio (<0.10) indicates that the computed weight for each factor is acceptable. Using a weighted linear combination (WLC), the landslide susceptibility map is derived (step 3). It is one of the most often used decision rule, which can be used in GIS (Malczewski 1999). In WLC, the eight factors layers are overlaid and multiplied by their corresponding weight values.

Information value

The information value model was originally proposed by Yin and Yan (1988) and modified slightly by Van Westen (1993). It is a statistical method for spatial prediction of an event based on the parameter and event relationship. It has been very useful method for landslide susceptibility mapping by determining the influence of parameters governing landslide occurrence in an area (Zêzere 2002). The information value I_i for a parameter i can be calculated using the following formula (Eq. 2) (Yin and Yan 1988; Melo et al. 2012):

$$I_i = \log \frac{S_i / N_i}{S / N} \quad (2)$$

where

S_i The number of grid cells involving the parameter i and containing landslide

N_i The number of grid cells involving the parameter i

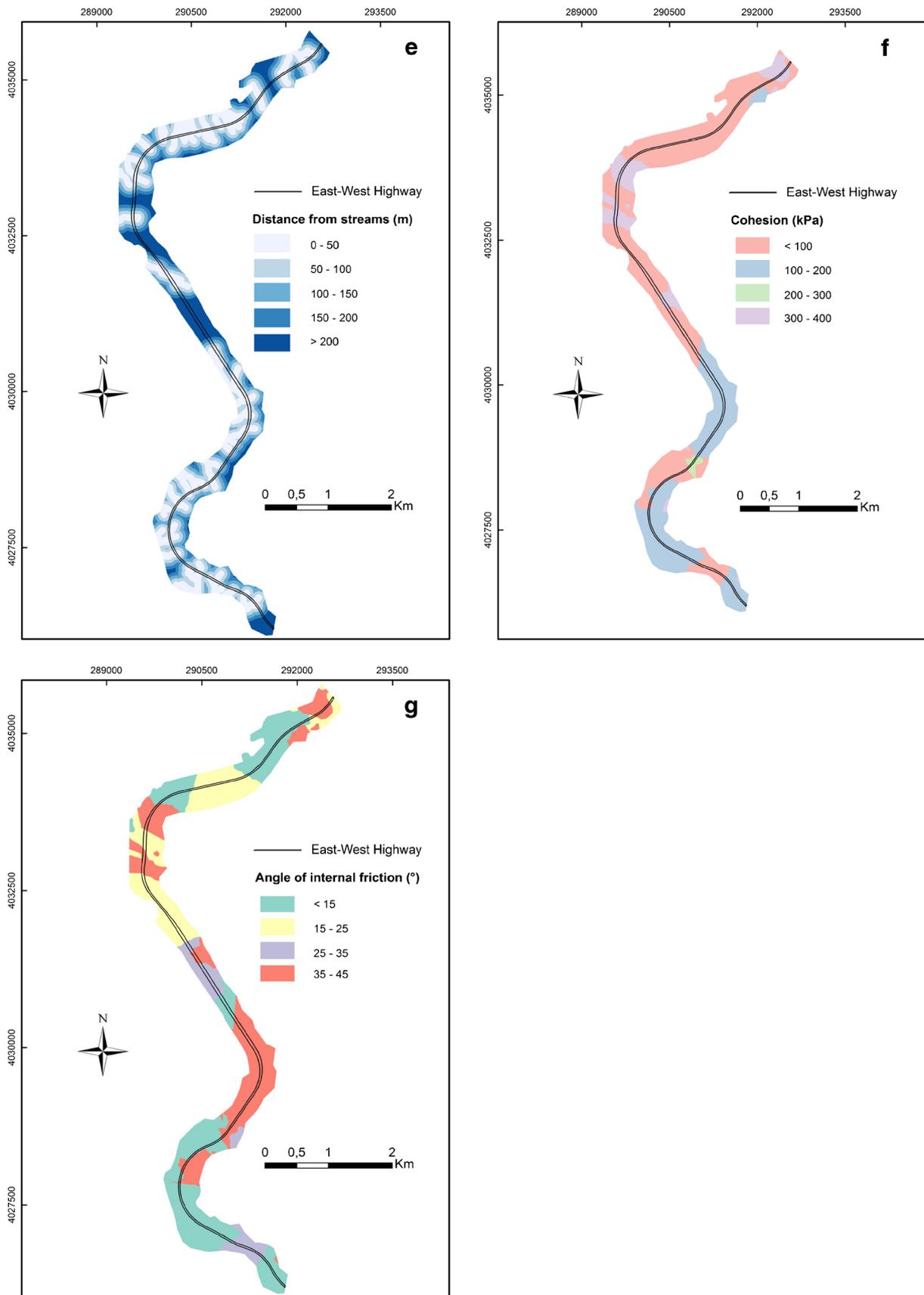


Fig. 6 (continued)

Table 1 Scale of preference between two parameters in AHP (Saaty 1977)

Preference factor	Degree of preference	Explanation
1	Equally	Two factors contribute equally to the objective.
3	Moderately	Experience and judgment slightly to moderately favor one factor over another.
5	Strongly	Experience and judgment strongly or essentially favor one factor over another.
7	Very strongly	A factor is strongly favored over another and its dominance is showed in practice.
9	Extremely	The evidence of favoring one factor over another is of the highest degree possible of an affirmation.
2, 4, 6, 8	Intermediate	Used to represent compromises between the preferences in weights 1, 3, 5, 7, and 9.
Reciprocals	Opposites	Used for inverse comparison.

- S The number of grid cells with landslide
- N The total number of data points (grid cells)

Therefore, the total information value in a grid cell *j* is computed using Eq. 3:

$$I_j = \sum_{i=1}^m X_{ji} I_i \tag{3}$$

where *m* is the number of the considered parameters, *i* = 1, 2, 3..., *m* and *j* = 1, 2, 3..., *N*. *X_{ji}* takes the value of 0 if the considered factor is absent within the pixel and equals to 1, if it is present. When *I_i* is negative, the likelihood of a landslide is less than average. On the other hand, when *I_i* is positive, the likelihood of a landslide occurrence is greater than average. This means that the likelihood of a landslide occurrence increases as the information value increases.

Table 2 Pair-wise comparison matrix, factor weights and consistency ratio of landslide influencing factors

Influencing factors	Pair-wise comparison matrix								Weight
	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	
[1] distance from faults	1								0.0720
[2] distance from streams	1/4	1							0.0254
[3] slope	4	7	1						0.3071
[4] aspect	1	4	1/4	1					0.0720
[5] lithology	3	6	1/2	3	1				0.2031
[6] land use	1	4	1/4	1	1/3	1			0.0720
[7] cohesion	2	5	1/3	2	1/2	2	1		0.1242
[8] angle of internal friction	2	5	1/3	2	1/2	2	1	1	0.1242

Consistency ratio = 0.014

Results and discussion

The landslide susceptibility maps were prepared using two different weighting procedures in a GIS-based approach.

Analytic hierarchy process

Table 2 gives the relative weights of causative factor obtained from pair-wise comparison matrix. They indicate that the slope angle is the most important parameter with a value of 0.3071, followed by lithology, internal friction, and cohesion with 0.2031, 0.1242, and 0.1242, respectively. Whereas distance from faults, aspect, land use, and distance from streams are less important. In this study, the consistency ratio (CR) is 0.014; the ratio indicates an appropriate degree of consistency, adequate to recognize the weight of each factor.

The integration of the various causative factors in a single landslide susceptibility index (LSI) is given by a procedure based on the weighted linear sum (Eq. 4).

$$LSI_{AHP} = 0.0720 \times \text{distance from faults} + 0.0254 \times \text{distance from streams} + 0.3071 \times \text{slope} + 0.0720 \times \text{aspect} + 0.2031 \times \text{lithology} + 0.0720 \times \text{landuse} + 0.1242 \times \text{cohesion} + 0.1242 \times \text{angle of internal friction} \tag{4}$$

The resulting landslide susceptibility map generated through the AHP method is shown in Fig. 7a. It was reclassified into four relative susceptibility zones: low, moderate, high, and very high based on natural break classification method (Pourghasemi et al. 2012). According to Fig. 7a, the susceptibility condition is very high in the extreme north part of the study area. This area is mainly represented by agricultural fields. Moderate landslide susceptible zones are shown to be widely distributed in the south part and in the extreme north of the study area. The low landslide susceptible areas are mainly in the central and in the south of the study area. From Table 3, it can be observed that 44% of the total area was found to be of low landslide susceptibility. Moderate

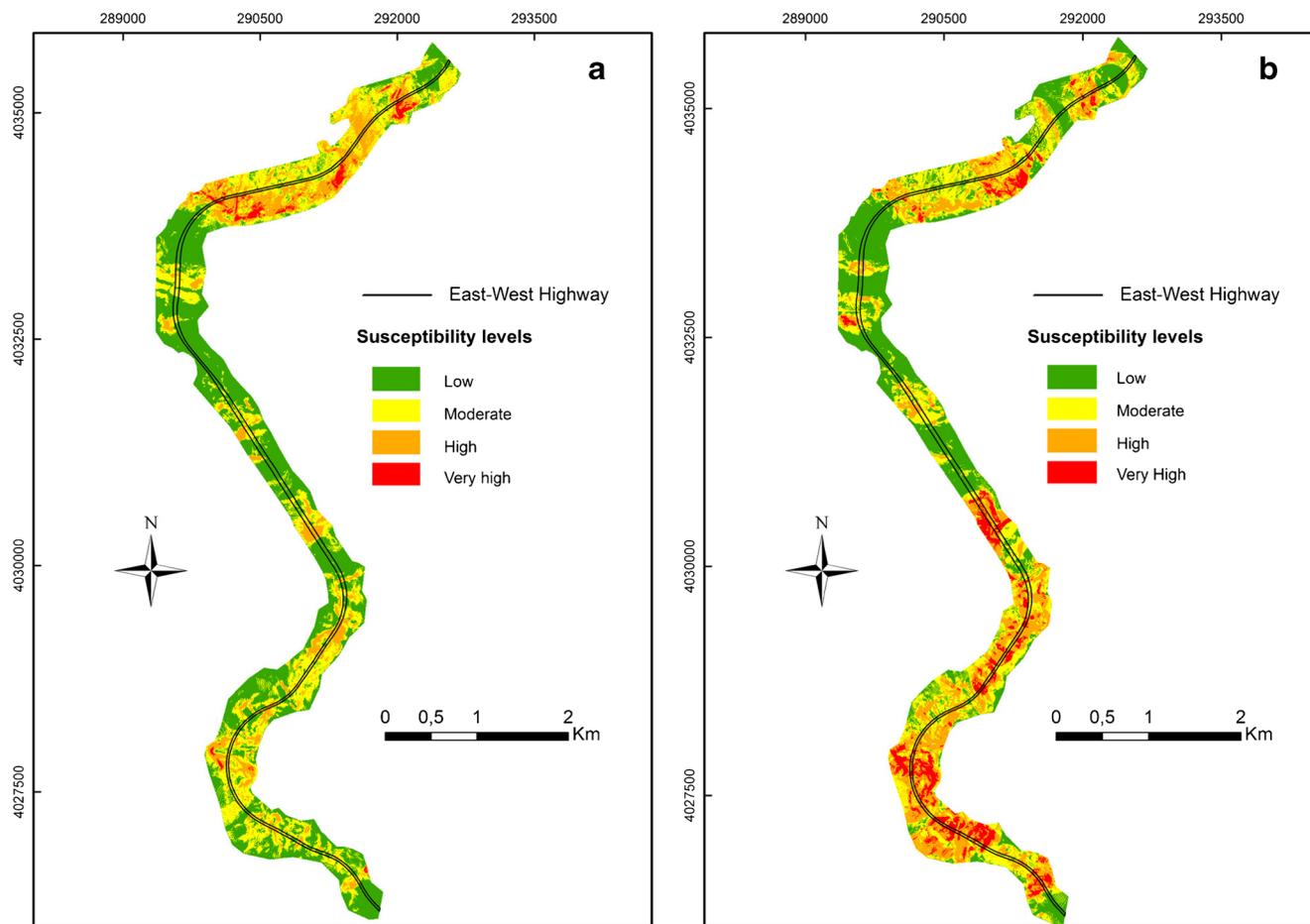


Fig. 7 Landslide susceptibility map generated using **a** analytic hierarchy process and **b** information value

susceptible zone represents 35% of the total area. The high and very high susceptible areas are 18 and 3%, respectively, of the total study area. It has been also observed that landslide density in the various susceptibility zones does not increase with the degree of susceptibility.

Information value

To perform the IV modeling, every thematic map was crossed with the landslide inventory map using the ArcGIS software, and the information value in each class was calculated (Eq. 2). The resultant weights of each thematic map for the IV model are given in Table 4.

The obtained IV values increase gradually as the slope angle increases until they reaches the range of 15–25°, after which, IV values decrease. The 15–25° class has the highest information value (0.506) followed by 10–15° class (0.352). The lowest value was registered for slope class 0–5° (–1.261). From this observation, it is clear that the landslide occurrence probability is high in areas where the slope angle is between 15 and 25°. The landslide occurrence decreases as the slope becomes higher than 25°. In the case of slope aspect, most landslides occurred are those facing south (IV = 0.335), south-east (IV = 0.233) and west (IV = 0.184). The southern slope aspect with a great IV may be related to sirocco hot wind. The east-facing slopes are less susceptible to landslides as they

Table 3 Landslide density in the different susceptibility zones of the study area (AHP method)

Method	Susceptibility zones	Area		Landslide area		Landslide density
		(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	
AHP	Low	2.578	44	0.008	14	0.0032
	Moderate	2.025	35	0.028	49	0.0140
	High	1.055	18	0.019	33	0.0181
	Very high	0.173	3	0.003	4	0.0158

Table 4 Spatial relationship between each factor contributing to a landslide and the landslide using the IV model

Parameter	S_i (m ²)	N_i (m ²)	Information value
Slope (°)			
0–5	775	1,413,400	–1261
5–10	11,800	2,536,900	–0.333
10–15	28,950	1,286,750	0.352
15–25	16,125	502,775	0.506
>25	700	90,650	–0.113
Aspect			
N	6175	1,190,025	–0.285
NE	875	327,850	–0.574
E	175	168,775	–0.985
SE	5450	318,375	0.233
S	13,300	614,400	0.335
SW	7750	857,850	–0.044
W	15,200	994,450	0.184
NW	9425	1,358,750	–0.159
Lithology			
Recent screes (Quaternary)	500	350,675	–0.846
Arable land (Quaternary)	13,850	1,407,075	–0.007
Old glaciais with pebbles (Salétian)	0	131,475	0.000
Conglomerate and sandy clay (Mio-Pliocene)	8900	655,450	0.133
Numidian sandstone	8200	1,288,900	–0.197
Marl and clay with boulders (Priabonian)	15,100	904,200	0.222
Clear limestone (Ypresian–Lower Lutetian)	0	3525	0.000
Flinty limestone (Ypresian–Lower Lutetian)	0	46,600	0.000
Yellow boulder’s containing black marl (Maastrichtian–Paleocene)	10,525	675,525	0.192
Limestone of Jebel Oum Settas (Cenomanian)	625	132,425	–0.326
Limestone with miliolidea (Aptian)	0	156,675	0.000
Dolomitic limestone (Barremian)	650	77,950	–0.079
Distance from faults (m)			
0–50	15,850	1,202,525	0.112
50–150	26,100	1,455,550	0.253
150–250	5925	917,575	–0.190
250–550	6850	1,577,800	–0.363
550–850	1175	422,500	–0.556
>850	2450	254,525	–0.017
Land use			
Built-up area	675	103,000	–0.184
Rock and bare soils	32,825	3,551,100	–0.034
Agricultural land	24,850	2,176,375	0.057
Distance from streams (m)			
0–50	30,525	1,875,150	0.211
50–100	19,575	1,449,625	0.130
100–150	6275	1,012,250	–0.208
150–200	1350	637,575	–0.675
>200	625	855,875	–1137
Angle of internal friction (°)			
<15	16,250	1,167,025	0.143
15–25	33,500	3,124,375	0.030
25–35	8500	1,527,025	–0.255
35–45	100	12,050	–0.081
Cohesion (kPa)			
<100	32,600	2,501,325	0.115
100–200	25,000	2,138,475	0.067
200–300	625	850,925	–1134
300–400	125	339,750	–1435

$$N = 5,830,475 \text{ m}^2; S = 58,350 \text{ m}^2$$

have the lowest IV. In terms of lithology, conglomerate and sandy clay, yellow boulder’s containing black marl and marl with boulder’s clay have positive information values (0.133, 0.192, and 0.222, respectively). The distance from fault criteria indicate that IV takes the highest value (0.253) for

distances of 50–150 m from the faults. In the case of land use, only agricultural land class has a positive value of 0.057. The distance from streams gives an information value of 0.211 for distances less than 50 m and 0.130 for 50–100 m distances. These two values show that landslides are more

Table 5 Landslide density in the different susceptibility zones of the study area (IV method)

Method	Susceptibility zones	Area		Landslide area		Landslide density
		(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	
IV	Low	2225	38	0.003	4	0.0012
	Moderate	1716	29	0.013	23	0.0078
	High	1358	23	0.017	30	0.0127
	Very high	0,531	10	0.025	43	0.0471

likely to occur under the influence of streams within a distance not more than 100 m. For the geotechnical parameters (cohesion and angle of internal friction), the obtained IV showed a systematic increase when there was a decrease of one or both of them. The highest values have noted for the <15° class (0.143) and <100 kPa class (0.115), respectively, for angle of internal friction and cohesion. These results show that landslides are more likely to occur in soils and rocks with poor geotechnical properties.

Finally, all the weights of each class calculated with the information value model were analyzed by summing the retained layer information to produce the final landslide susceptibility index (LSI) map by the following equation:

$$LSI_{IV} = (I \text{ slope}) + (I \text{ aspect}) + (I \text{ lithology}) + (I \text{ distance from faults}) \\ + (I \text{ land use}) + (I \text{ distance from streams}) \\ + (I \text{ angle of internal friction}) \\ + (I \text{ cohesion}) \quad (5)$$

The final calculated LSI values of the study area for the information value model range from -5.2573 to 1.8045. The landslide susceptibility map produced from the information value method (Fig. 7b) was subdivided into four hierarchic classes (very high, high, moderate, and low) using the natural break method (Pourghasemi et al. 2012). The very high susceptibility zones are mainly shown in the north part and in the south of the study area. The medium susceptibility zones have almost the same distribution as for of the very high susceptibility zones. The landslide susceptibility is low in the central–northern part of the study area. The constructed map also displays an excellent coherence with field observations, particularly the location of the mass slide that occurred on January 2014 in the left tube of the tunnel 1 in Jebel El Ouahch which falls into the high susceptibility zone.

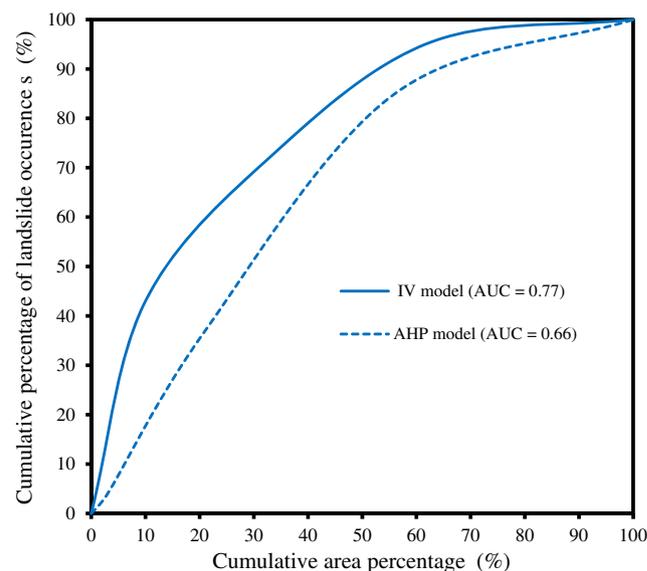
From Table 5, it can be seen that 38% of the total area which is designated to be of low landslide susceptibility. Moderate and high susceptibility zones constitute 29 and 23% of the total area, respectively, while the percentage of very high susceptibility area is 10%. The landslide density for the very high susceptible zone is 0.0471, which is distinctly larger than for the other susceptible zones. The landslide density for the high, moderate, and low susceptible zones are respectively 0.0127, 0.0078, and 0.0012. These results show

that there is a gradual decrease in landslide density from the very high to the low susceptible zone and there is also considerable separation in landslide density values between the different susceptible zones. Hence, it can be concluded that the calculated and classified susceptibility zones are found to be in good agreement with occurrences of preexisting landslides (Kayastha et al. 2013).

Validation of the predictive models

For the validation procedure, the receiver operating characteristics (ROC) curve was drawn, and the area under curve (AUC) value was calculated by using the XLSTAT-Pro 7.5 software package. The AUC represents the quality of the model to reliably predict of the occurrence of landslides (Chen et al. 2016). A good fit model has AUC values that range from 0.5 to 1, while values below 0.5 represent a random fit.

In this research, a success rate curve has been used for validation, as shown in Fig. 8. The success rate curve is obtained by plotting the cumulative percentage of observed landslide occurrence against the areal cumulative percentage in decreasing LSI values. The area under the curve can be used to assess the prediction accuracy qualitatively (Lee 2005). The

**Fig. 8** Success rate curve of the constructed landslide susceptibility models

AUC for the landslide susceptibility map produced using the IV method is 0.7659, which means that the overall success rate of the landslide susceptibility map is 76.59%. A success rate of 65.94% was found for the landslide susceptibility map based on the AHP method. The results obtained from success rate graph indicate that the information value model look to be more accurate in terms of the performance of landslide susceptibility mapping and has better prediction accuracy than AHP model in the study area.

Conclusions and perspectives

Landslides are the most disastrous natural hazards in the north-east of Algeria. Their assessment should be done before the construction of all types of engineering projects. A correct assessment of the probability of landslide occurrence is therefore required for road projects such as A1 highway. For this purpose, AHP and IV models were applied to produce landslide susceptibility maps along EWH road section in Constantine region, NE Algeria. To achieve this objective, a landslide inventory map was prepared using 29 landslide locations. Eight landslide influencing factors were considered, i.e., slope gradient, slope aspect, lithology, distance from streams, distance from fault, land use, and geotechnical parameters (Cohesion and internal friction angle). For both methods, factors were assessed, and then weights have been attributed to each of the considered factors. The results of validation using the ROC curve of the two models have good agreement with other author's work. The AUC results show that the success rate of the IV model is higher (success rate 76.59%) comparatively with the success rate of the AHP model (success rate 65.94%). This means that the models produced in this study showed reasonably good accuracy in predicting the landslide susceptibility of the study area especially the one produced from the information value method. This method can be considered fully objective and reliable; it provided good results that agree well with the landslide inventory map, as suggested by the percentage of landslides that increased with the degree of susceptibility.

Earth moving work alters the slope stability conditions of the study area, making them prone to landslides. To evaluate the situation in the study area, a road buffer of 50 m was placed around the road axis, marking the area likely influenced by cutting-related slope stability. Thirty percent of the landslides occur in the road buffer area indicating its influence on landsliding.

The landslide susceptibility maps presented in this research constitute an important tool for decision maker, planners, and engineers. They can make rapid and well-grounded decisions to minimize and avoid the damage and losses caused by existing and future landslides, or avoid the highly susceptible zones, by suitable preventive measures and mitigation procedures. Future research is foreseen, which will include the

application of other approaches in the study area such as logistic regression, artificial neural network, and frequency ratio. We plan to study the accuracy of these approaches in the form of a comparative study with the introduction of new geo-environmental factors and to replicate the best outcomes to the other EWH sections.

Acknowledgements The authors would like to acknowledge the anonymous reviewers for their constructive suggestions. The authors are thankful to the National Highways Agency (ANA) of Algeria for providing data, and to the centre GeoBioTec|UA (UID/GEO/04035/2013), Portugal. They also want to express their gratitude to everyone who provided assistance in realizing this study.

References

- Akgun A, Türk N (2010) Landslide susceptibility mapping for Ayvalik (Western Turkey) and its vicinity by multicriteria decision analysis. *Environ Earth Sci* 61(3):595–611
- Aleotti P, Chowdhury R (1999) Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull Eng Geol Environ* 58(1):21–44
- Ayalew L, Yamagishi H (2005) The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65(1):15–31
- Ayalew L, Yamagishi H, Marui H, Kanno T (2005) Landslides in Sado Island of Japan: part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Eng Geol* 81(4):432–445
- Bourenane H, Bouhadad Y, Guettouche MS, Braham M (2015) GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria). *Bull Eng Geol Environ* 74(2):337–355
- Chen W, Chai H, Zhao Z, Wang Q, Hong H (2016) Landslide susceptibility mapping based on GIS and support vector machine models for the Qianyang County, China. *Environ Earth Sci* 75(6):1–13
- Choi J, Oh HJ, Lee HJ, Lee C, Lee S (2012) Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS. *Eng Geol* 124:12–23
- Cruden DM, Varnes DJ (1996) Landslide types and processes, special report, transportation research board, national academy of sciences 247:36–75
- Dai FC, Lee CF (2002) Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42(3):213–228
- Dai FC, Lee CF, Li J, Xu ZW (2001) Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environ Geol* 40(3):381–391
- Das I, Sahoo S, van Westen C, Stein A, Hack R (2010) Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India). *Geomorphology* 114(4):627–637
- Das I, Stein A, Kerle N, Dadhwal VK (2012) Landslide susceptibility mapping along road corridors in the Indian Himalayas using Bayesian logistic regression models. *Geomorphology* 179:116–125
- Fall M, Azzam R, Noubactep C (2006) A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping. *Eng Geol* 82(4):241–263
- Galli M, Ardizzone F, Cardinali M, Guzzetti F, Reichenbach P (2008) Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology* 94(3):268–289

- Guiraud R (1973) Évolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie, d'après l'étude du bassin de Hodna et des régions voisines. Thèse de Science, Université Nice, 270 p
- Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, Reichenbach P (1999) Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31(1): 181–216
- Guzzetti F, Reichenbach P, Cardinali M, Galli M, Ardizzone F (2005) Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology* 72(1):272–299
- Hadji R, Errahmane Boumazbeur A, Limani Y, Baghem M, el Madjid Chouabi A, Demdoun A (2013) Geologic, topographic and climatic controls in landslide hazard assessment using GIS modeling: a case study of Souk Ahras region, NE Algeria. *Quat Int* 302:224–237
- Hadji R, Rais K, Gadri L, Chouabi A, Hamed Y (2017) Slope failure characteristics and slope movement susceptibility assessment using GIS in a medium scale: a case study from Ouled Driss and Machroha municipalities, Northeast Algeria. *Arab J Sci Eng* 42(1): 281–300
- Kayastha P, Dhital MR, De Smedt F (2013) Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Comput Geosci* 52: 398–408
- Lee S (2005) Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *Int J Remote Sens* 26(7):1477–1491
- Lee S, Evangelista DG (2006) Earthquake-induced landslide-susceptibility mapping using an artificial neural network. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6(5):687–695
- Lee S, Min K (2001) Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environ Geol* 40(9):1095–1113
- Lee S, Pradhan B (2007) Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* 4(1):33–41
- Lee S, Ryu JH, Won JS, Park HJ (2004) Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Eng Geol* 71(3):289–302
- Lee S, Ryu JH, Kim IS (2007) Landslide susceptibility analysis and its verification using likelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models: case study of Youngin, Korea. *Landslides* 4(4):327–338
- Lee S, Hwang J, Park I (2013) Application of data-driven evidential belief functions to landslide susceptibility mapping in Jinbu, Korea. *Catena* 100:15–30
- Leir M, Michell A, Ramsay S (2004) Regional landslide hazard susceptibility mapping for pipelines in British Columbia. *Geo-engineering for the society and its environment*. In: 57th Canadian geotechnical conference and the 5th joint CGS-IAH conference, pp. 1–9
- Malczewski J (1999) GIS and multicriteria decision analysis. Wiley, New York
- Meinhardt M, Fink M, Tüschel H (2015) Landslide susceptibility analysis in central Vietnam based on an incomplete landslide inventory: comparison of a new method to calculate weighting factors by means of bivariate statistics. *Geomorphology* 234:80–97
- Melchiorre C, Matteucci M, Azzoni A, Zanchi A (2008) Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation. *Geomorphology* 94(3):379–400
- Melo R, Vieira G, Caselli A, Ramos M (2012) Susceptibility modelling of hummocky terrain distribution using the information value method (Deception Island, Antarctic Peninsula). *Geomorphology* 155:88–95
- Neuhäuser B, Terhorst B (2007) Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology* 86(1):12–24
- Poudyal CP, Chang C, Oh HJ, Lee S (2010) Landslide susceptibility maps comparing frequency ratio and artificial neural networks: a case study from the Nepal Himalaya. *Environ Earth Sci* 61(5):1049–1064
- Pourghasemi HR, Pradhan B, Gokceoglu C (2012) Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Nat Hazards* 63(2):965–996
- Pradhan B, Lee S (2010) Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models. *Environ Earth Sci* 60(5):1037–1054
- Raoult A (1974) Géologie du centre de la chaîne Numidique (Nord du Constantinois, Algérie). *Mem Soc Géol France* 53:121–163P
- Saaty TL (1977) A scaling method for priorities in hierarchical structures. *J Math Psychol* 15(3):234–281
- Saaty TL (1980) *The analytic hierarchy process: planning, priority setting and resource allocation*. McGraw-Hill, New York
- Saaty TL (2003) Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *Eur J Oper Res* 145(1):85–91
- Saaty TL, Vargas LG (2012) *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process* (vol. 175). Springer Science & Business Media, Heidelberg
- Saha AK, Gupta RP, Arora MK (2002) GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas. *Int J Remote Sens* 23(2):357–369
- Saha AK, Gupta RP, Sarkar I, Arora MK, Csaplovics E (2005) An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation—with a case study in the Himalayas. *Landslides* 2(1):61–69
- Süzen ML, Doyuran V (2004) Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Eng Geol* 71(3): 303–321
- Van Westen CJ (1993) Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. ITC Publication, vol. 15. International Institute for Aerospace and Earth Resources Survey, Enschede 245 pp
- Van Westen CJ, Rengers N, Terlien MTJ, Soeters R (1997) Prediction of the occurrence of slope instability phenomenon through GIS-based hazard zonation. *Geol Rundsch* 86(2):404–414
- Van Westen CJ, Rengers N, Soeters R (2003) Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Nat Hazards* 30(3):399–419
- Varnes DJ (1984) Landslide hazard zonation: A review of principles and practice. *Natural hazard*, 3. United nations educational, scientific and cultural organization 63 p
- Vila JM (1980) La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algérotunisiens. Thèse Doctorat, Université Paris, Travaux du département de géotectonique, Laboratoire de géologie structurale, Paris 665 p
- Wu CH, Chen SC (2009) Determining landslide susceptibility in Central Taiwan from rainfall and six site factors using the analytical hierarchy process method. *Geomorphology* 112(3):190–204
- Yalcin A, Reis S, Aydinoglu AC, Yomralioglu T (2011) A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena* 85(3):274–287
- Yin KL, Yan TZ (1988) Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. In: Bonnard C (ed) *Proc., Fifth International Symposium in Landslides, Lausanne*, vol. 2. A.A. Balkema, Rotterdam, pp 1269–1272
- Zêzere JL (2002) Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal). *Nat Hazards Earth Syst Sci* 2(1/2):73–82
- Zhou G, Esaki T, Mitani Y, Xie M, Mori J (2003) Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach. *Eng Geol* 68(3):373–386